



ФГБУ «ВИМС»

ЗАРУБЕЖНЫЕ ИНТЕРНЕТ-МАТЕРИАЛЫ

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

№ 10

Редактор-составитель: В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

	стр.
I. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ПРОГНОЗНЫХ ЦЕЛЯХ (пояс Торуд-Шахишин, Северо-Восточный Иран).....	5
1. Введение.....	5
2. Исследуемая территория и используемый набор данных.....	6
3. Методология.....	8
3.1. Метод случайного леса.....	9
3.2. Кривые успешности.....	10
4. Результаты и обсуждение.....	11
4.1. Предварительная обработка выбранных элементов.....	11
4.2. Извлечение наиболее эффективных одноэлементных геохимических следов.....	12
4.3. Картографирование особенностей для обнаружения локальных геохимических аномалий.....	13
4.4. Определение эффективных структурных контролирующих факторов.....	14
4.5. Модель случайного леса.....	16
4.6. Оценка модели перспективности.....	18
4.7. Определение поисковых площадей с применением t-метода Стьюдента.....	18
5. Выводы.....	19
II. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА В ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ (район Синьцзянь, Китай).....	20
1. Введение.....	20
2. Материалы и методы.....	20
2.1. Исследуемая территория и метод отбора проб.....	20
2.2. Анализ pXRF.....	21
2.3. Лабораторный анализ.....	22
3. Результаты.....	22
3.1. Анализ удобства использования pXRF.....	22
3.2. Влияние времени обнаружения на погрешность анализа.....	23
3.3. Надежность и стабильность pXRF.....	24
4. Обсуждение.....	26
4.1. Надежность pXRF.....	26
4.2. Геологическая значимость результата.....	27
4.3. Последствия для дальнейшей работы.....	28
5. Выводы.....	29
III. SCORE: НОВЫЙ БЫСТРЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СКАНЕР КЕРНА МИНЕРАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ...	30
1. Введение.....	30
2. Методология.....	33
3. Обсуждение.....	35
4. Выводы.....	44

IV. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ (АНР) ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (<i>Китай</i>).....	45
1. Введение.....	45
2. Метод аналитической иерархии.....	46
3. Построение и вес системы оценочных индексов.....	48
3.1. Построение системы оценочных индексов.....	48
3.2. Определение весов оценочных индексов.....	50
3.3. Метод взвешивания для моделей прогнозирования.....	51
4. Применение.....	52
5. Выводы.....	56
V. ПОИСКИ МЕДНЫХ РУДНЫХ ЖИЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОГРАММЕТРИИ С БПЛА (<i>район Шахзаде–Аббас, Иран</i>).....	58
1. Введение.....	58
2. Геологические условия.....	59
3. Материалы и методы.....	60
3.1. Тип платформы и параметры полета.....	60
3.2. Сбор и анализ данных.....	61
3.3. Подготовка геолого-структурной карты.....	62
3.4. Полевая заверка.....	63
4. Результаты и обсуждение.....	63
4.1. Полевая заверка и доработка геолого-структурной карты.....	65
5. Выводы.....	68
VI. ИЗОТОПЫ СВИНЦА ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ «НЕСОГЛАСИЯ» (<i>район Киггавик, Канада</i>).....	70
1. Введение.....	70
2. Геологические условия и урановая минерализация.....	72
3. Материалы и методы.....	73
4. Результаты.....	75
4.1. Сравнение процессов усвоения породы и выщелачивания.....	76
4.2. PAD Pathfinder Pb-Isotope и геохимия WAL: м-ния Бонг и Энд- Уран.....	79
4.3. Геохимия Pb-изотопного признака: Связь с потенциальным оруденением.....	85
5. Обсуждение.....	89
5.1. Оценка данных по изотопам Pb, методами расщепления и выщелачивания.....	90
5.2. Геохимическая оценка дисперсии Pb-изотопа Pathfinder: Contact prospect.....	96
6. Выводы.....	97
VII. ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ДДЗ «ASTER» (<i>рудный район Сар- Чешме, Иран</i>).....	99
1. Введение.....	99
2. Геология исследуемого района.....	102
3. Материалы и методы.....	103
3.1. Характеристики минералов и предварительная обработка данных ASTER.....	103

3.2. Реализация алгоритмов машинного обучения (ML).....	105
4. Анализ и результаты.....	110
4.1. Извлечение объектов из ASTER.....	110
4.2. Обучающая выборка.....	113
4.3. Классификация типов горных пород и анализ точности.....	114
4.4. Оценка спектральных областей как входных данных для алгоритмов ML.....	117
4.5. Влияние количества обучающих выборок в ML на общую точность.....	118
4.6. Оценка DEM как дополнительная функция для ввода данных.....	120
5. Обсуждение.....	120
6. Выводы.....	122
<i>Источники</i>	124

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

1. Введение

Фундаментальной задачей региональной и локальной геологоразведочной 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. Некоторыми из наиболее известных инструментов в этой специализированной области являются область концентрации (C-A), область спектра (S-A) и картирование особенностей (SM).

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 земли. Следовательно, для лучшего понимания и более конкретного определения локальных геохимических аномалий, связанных с минерализацией, надежные статистические методы, основанные на алгоритмах машинного обучения (MLAs), могут быть полезны при поисках. 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 хорошо известных MLA, которые часто использовались в различных приложениях.

В этом исследовании была использована интегрированная методология, включающая модели SM и RF, для анализа геохимических данных о донных отложениях, собранных в Торудско-Шахширинском поясе (TCB), для обнаружения геохимических аномалий $Cu \pm Au$. 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.

Наконец, 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 (ТЦШ) занимает площадь около 5000 км². Это часть магматической зоны Центрального Ирана (рис. 1).

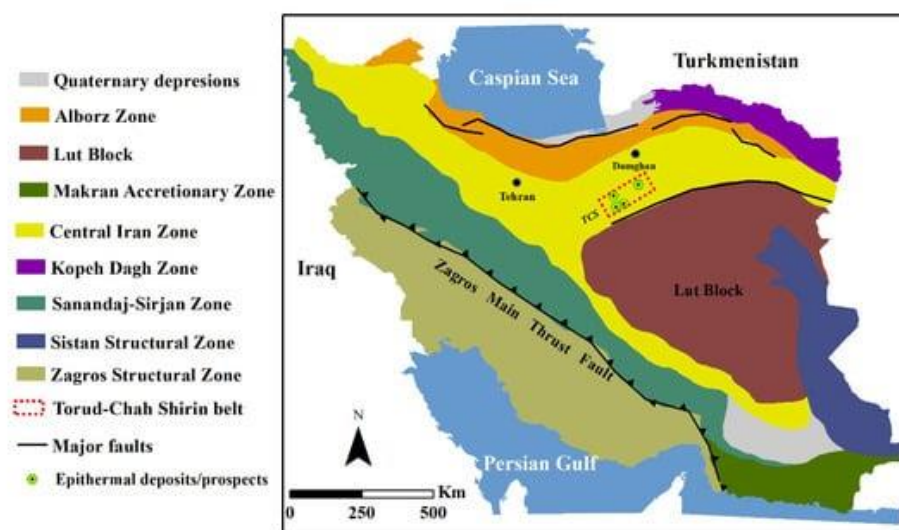


Рис. 1. Местоположение вулкано-интрузивного комплекса Торуд-Шахширин на северо-востоке Ирана.

Северо-западный тренд ТЦШ 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 (рис. 2).

Магматические породы включают граниты, микро-граниты, гранодиориты, микро-гранодиориты, микрокварц-монцониты, микромонцониты, 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 ± Au), Ганди (Au-Ag ± Pb-Zn), Аболхассани (Pb-Zn ± Ag ± Au), Чало (Cu ± Au), Дарестан (Cu ± Au), Багу (Au ± Cu), и др.

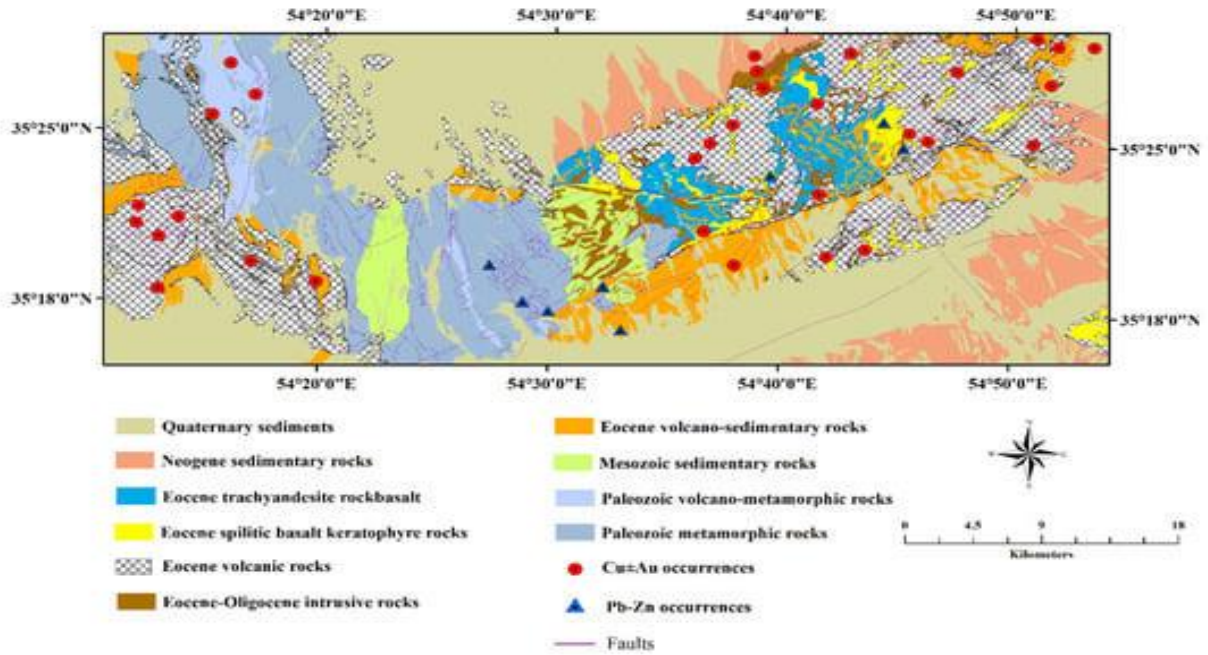


Рис. 2. Упрощенная геологическая карта ТСВ.

Жилы, прожилки и рассеянная минерализация в основном встречаются в позднем эоцене–олигоцене в пределах ТСВ. В качестве примера можно привести минерализацию на месторождении Дарестан в жилах северо-западного направления и вмещающих эоценовые вулканические и вулканокластические породы. Минеральная ассоциация, включающая халькопирит, пирит, незначительный халькоцит, тетраэдрит и ковеллит, указывает на высокую степень сульфидации эпитермальной системы.

Геохимическая съемка речных отложений при поисках полезных ископаемых в ТСВ была проведена в 1993 году. Были отобраны 1625 образцов донных отложений по сетке 1400×1400 м. (рис. 3).

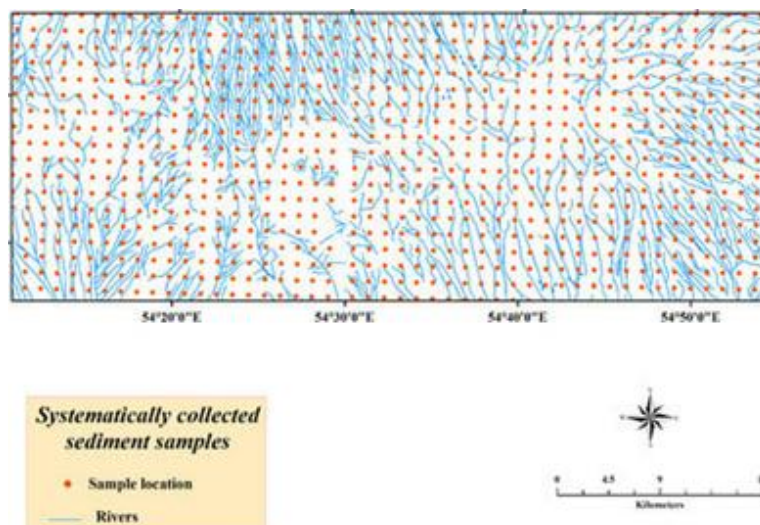


Рис. 3. Места отбора проб.

На следующем этапе 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) эпитеpмального 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

$(r_i \times r_i)$. На следующем шаге алгоритм измеряет значения средней концентрации $C[A(r_i)]$ для каждого окна, и, наконец, α индекс для каждого местоположения оценивается с помощью приведенного ниже уравнения:

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

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 останова. 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 n_{tree} и m_{try} , которые оказывают наиболее значительное влияние на модель случайного леса. (a) n_{tree} - это количество деревьев, которые нужно вырастить, и (b) m_{try} - это количество переменных, которые должны быть присвоены каждому узлу. Выбор огромного количества DTs (n_{tree}) обычно повышает точность модели, но слишком большие значения переменной m_{try} 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 месторождений полезных ископаемых, 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. 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.

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

С целью оценки нормальности *clr*-преобразованных данных были построены графики Q-Q (рис. 4) и выявлено, что в *clr*-преобразованных данных были некоторые отклонения. Можно сделать вывод, что концентрации элементов, связанных с минерализацией, демонстрируют фрактальные/мультифрактальные распределения с множественными геохимическими популяциями из-за сложных геологических процессов в ТСВ.

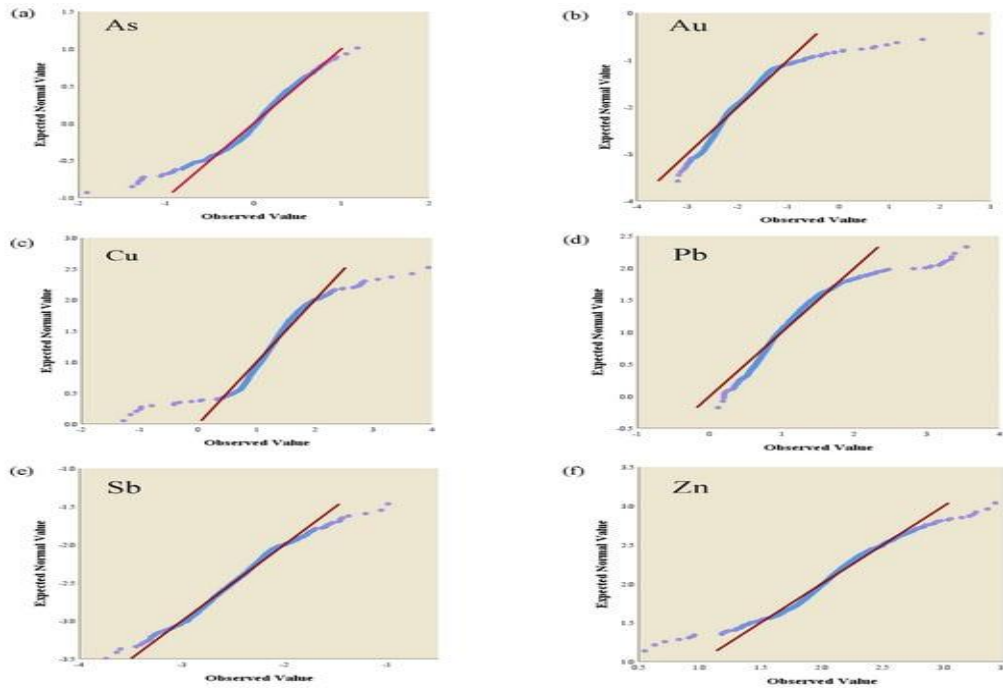


Рис. 4. Q-Q графики элементов, преобразованных clr: (a) As, (b) Au, (c) Cu, (d) Pb, (e) Sb и (f) Zn.

4.2. Извлечение наиболее 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.

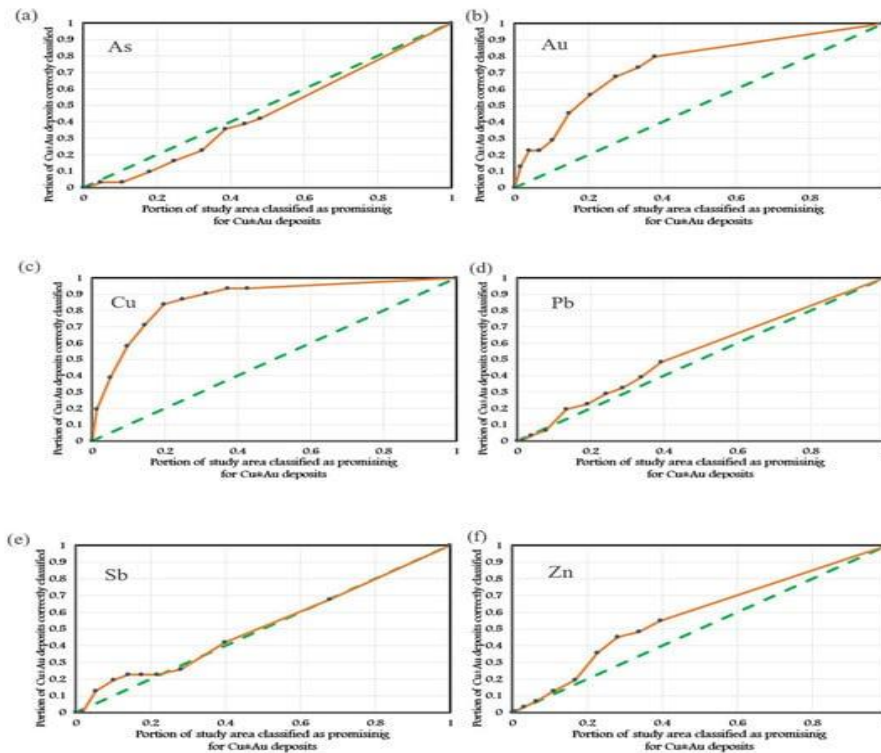


Рис. 5. Кривые успешности для преобразованных в clr: (a) As, (b) Au, (c) Cu, (d) Pb, (e) Sb и (f) Zn.

С этой целью были построены кривые успешности определения эффективных геохимических элементов, преобразованных cI_g (рис. 5а–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. 5b, c). Pb и Zn классифицируются как умеренно эффективные геохимические элементы на основе кривых их успешности (рис. 5d, f), поскольку их классы аномалий не демонстрируют соответствующей взаимосвязи с месторождениями Cu-Au. Кроме того, Sb (рис. 5e) 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. 5а).

4.3. Картографирование особенностей для обнаружения локальных геохимических аномалий.

После распознавания эффективных (наиболее, умеренных и наименьших) и неэффективных геохимических элементов, связанных с минерализацией в ТСВ, SM была выполнена для геохимических значений Au, Cu, Pb и Zn, преобразованных cI_g , чтобы выделить локальные аномалии (рис. 6).

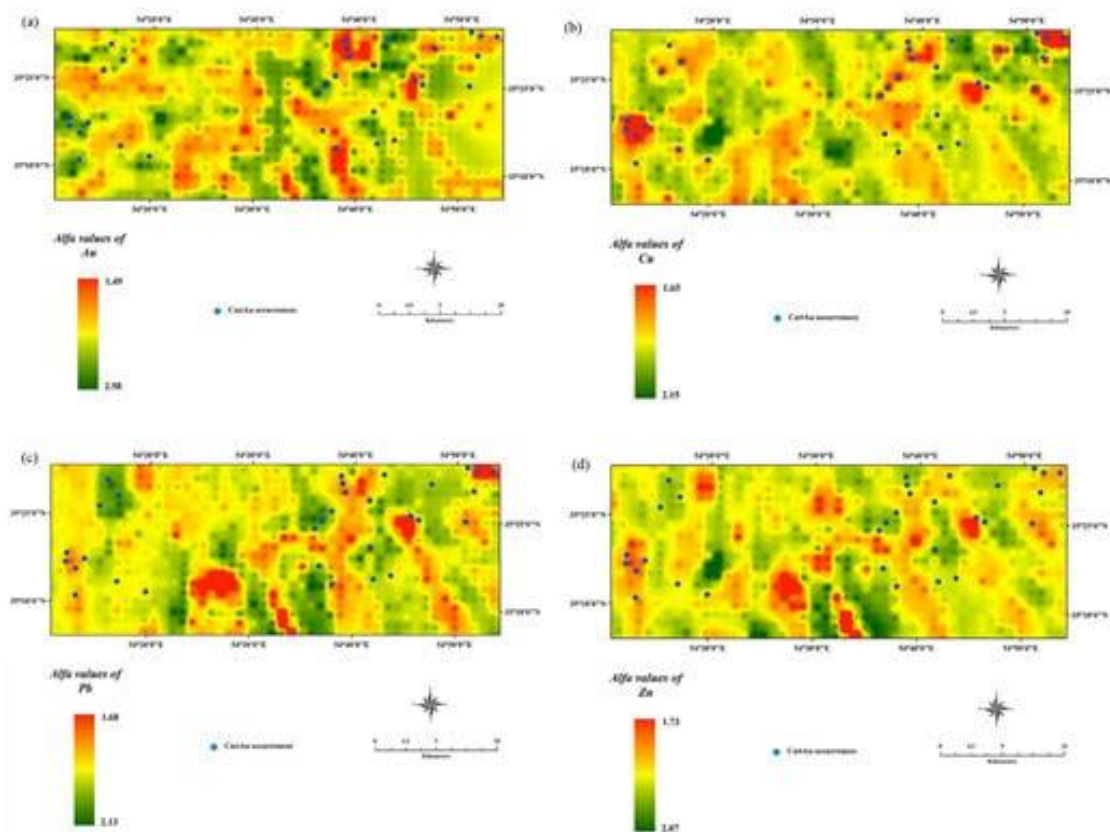


Рис. 6. Карты IDW значений α , связанных с: (a) Au, (b) Cu, (c) Pb и (d) Zn.

Однако при применении SM к геохимическому набору данных, преобразованному clr , возникла проблема, которая состояла из отрицательных значений, что приводило к ошибочным результатам. Для решения этой проблемы первоначально был применен положительный сдвиг к преобразованным в clr 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 clr , 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. 6). Алгоритм SM был реализован в программе MATLAB R2031a.

4.4. Определение эффективных 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.

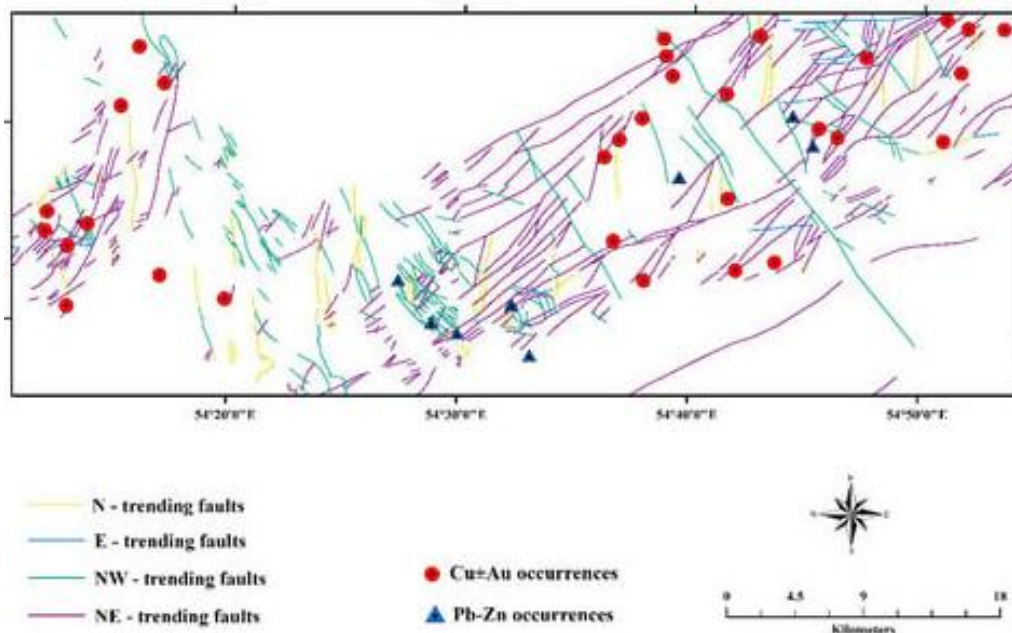


Рис. 7. Связи между различными разломами с известными проявлениями полезных ископаемых в TCS.

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. 7).

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. 8a–d). Кроме того, была составлена карта плотности разломов как еще один тектонический контроль рудообразующих процессов в поясе ТСВ (рис. 8e).

Наконец, благодаря результатам построения кривых успешности, карты расстояния до разломов с мелким направлением и плотности разломов были признаны эффективными структурными слоями (рис. 9b, e).

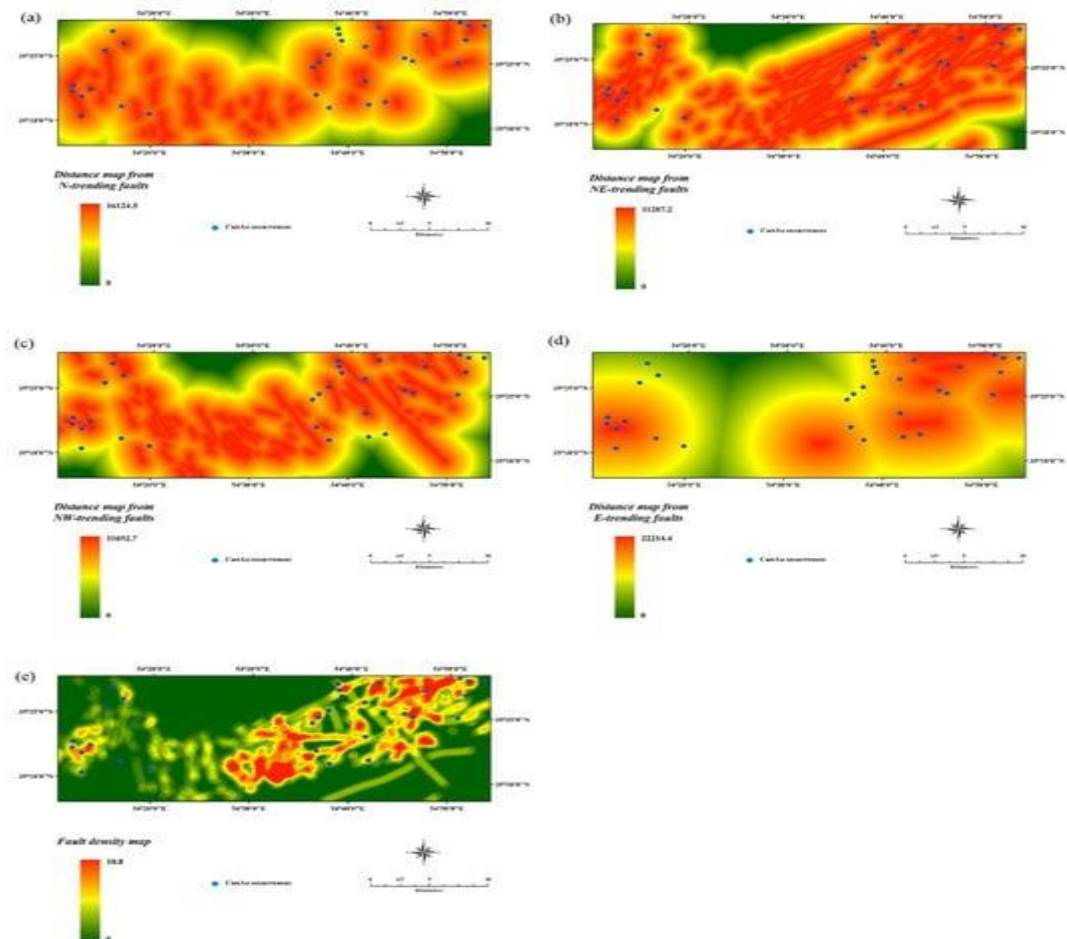


Рис. 8. Карты расстояний от различных разломов: (a) N-направление, (b) NE-направление, (c) NW-направление, (d) E-направление и (e) карта плотности разломов.

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, E-трендовое и NW-трендовое) рассматривались как неэффективные структурные факторы (рис. 9а, с, d).

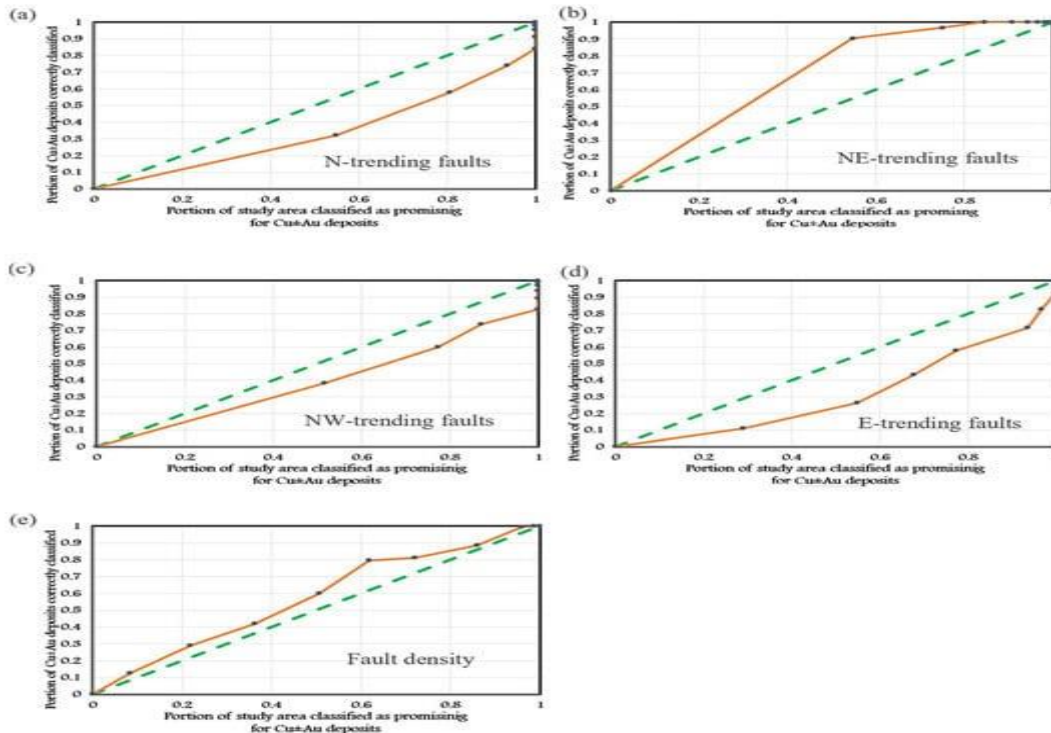


Рис. 9. Кривые успешности для различных разломов: (а) N, (b) NE, (с) NW, (d) E и (е) карта плотности

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 (здесь перспективных участков = 31).

(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.

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%

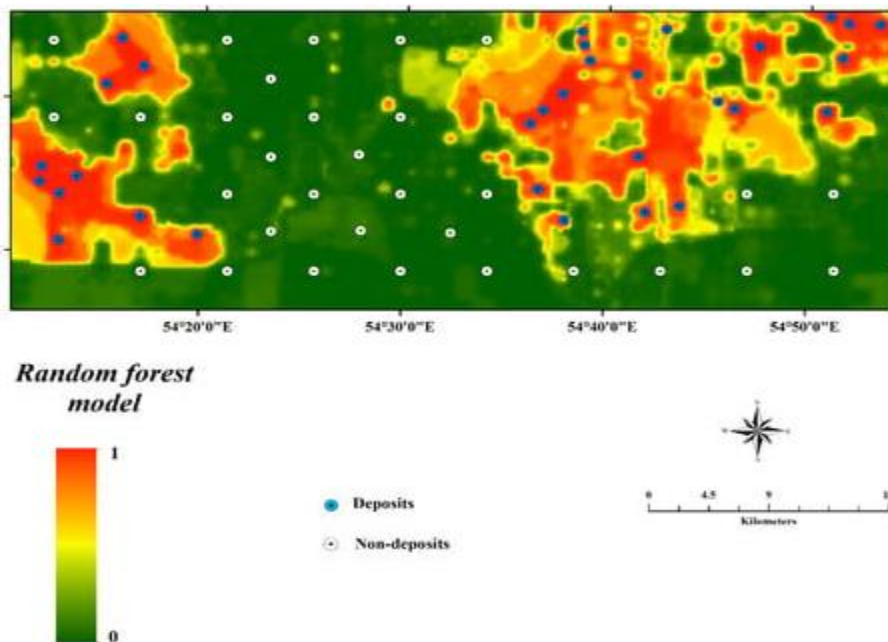


Рис. 10. Прогнозная карта потенциальной минерализации, полученные с помощью RF-модели с использованием сингулярного анализа.

Ошибка ООВ 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 10, модель RF выявила взаимосвязь между районами с высоким уровнем благоприятствования и районами, состоящими из известных залежей Cu ± Au.

4.6. Оценка модели перспективности.

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

Как видно на рисунке 11, кривая успешности RF-модели вышла за пределы калибровочной линии, и это означает, что прогностическая модель успешно получила положительную взаимосвязь с известными месторождениями/проявлениями Cu ± Au.

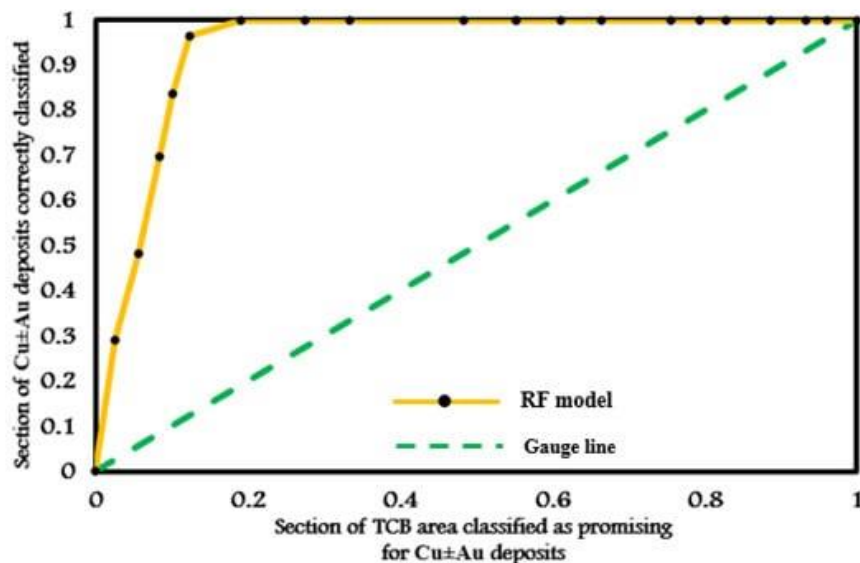


Рис. 11. Кривая успешности сгенерированной RF-прогностической модели месторождений Cu ± Au.

4.7. Определение поисковых площадей с применением *t*-метода Стьюдента.

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. 12а). Геохимические объекты, расположенные на прогнозной карте, основанной на сингулярности, пространственно коррелируют с большинством известных месторождений в ТСВ (рис. 12б).

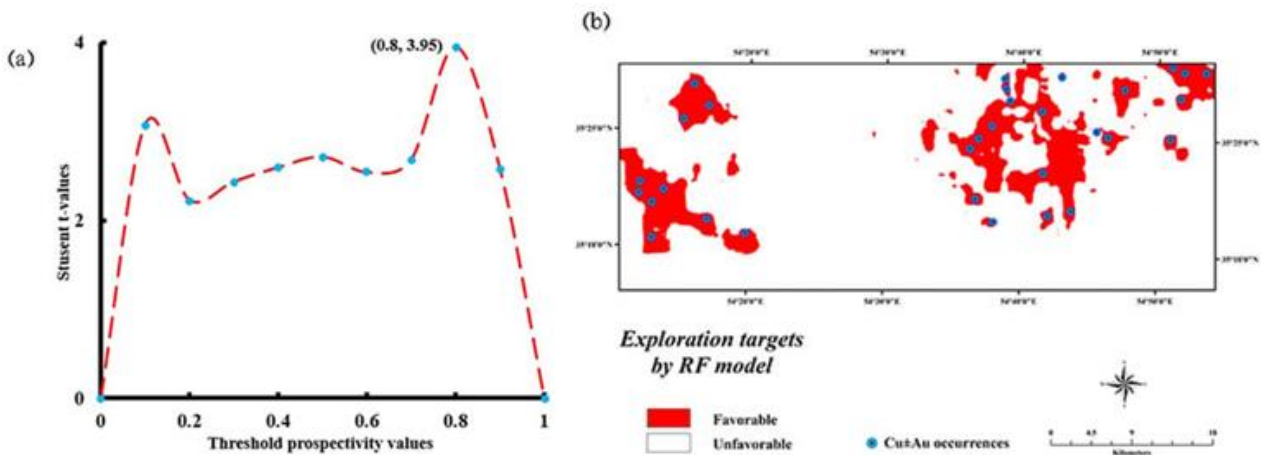


Рис. 12. (а) t -значения Стьюдента, измеренные для дискретизации прогностической модели. (б) радиочастотная модель, основанная на дихотомических особенностях,

5. Выводы.

В настоящем исследовании 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. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА В ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ (район Синьцзянь, Китай) [6].

1. Введение.

pXRF позволяет геологам качественно или полуколичественно определять концентрации различных элементов всего за десятки секунд, тем самым повышая эффективность процесса и снижая связанные с этим затраты на крупномасштабные исследования. Однако известно, что результаты pXRF варьируются в зависимости от времени обнаружения, а также типа и содержания воды в образцах. Предполагается, что полученные данные имеют низкую точность, и по этой причине спектрометрия pXRF не находит широкого применения в крупномасштабных проектах по разведке полезных ископаемых. 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.

Одной из очевидных особенностей обычных программ лабораторного анализа является то, что предварительная обработка образца и процедуры анализа занимают много времени и требуют высокого уровня знаний 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 их сравнения из разных лабораторий. Таким образом, возможность быстрого и простого анализа геохимических образцов была бы полезна для устранения вышеуказанных проблем. Многие исследования показали, что pXRF может быть успешно применен для анализа содержания элементов в различных матрицах, таких как растительность, почва, горные породы или сплавы. Чтобы предоставить рекомендации по эффективной работе с pXRF при поисках, необходимо оценить его применение в реальном геохимическом проекте.

В этом исследовании pXRF использовался для оценки концентраций элементов в горных породах и порошкообразных образцах, и эти результаты сравнивались с результатами, полученными с помощью лабораторного анализа. Оценивалась применимость pXRF в реальных поисковых геохимических проектах.

2. Материалы и методы

2.1. Исследуемая территория и метод отбора проб.

Исследования проводились в рудном районе Калатаге в горах Восточного Тянь-Шаня в Синьцзяне, Китай. В последние годы в районе было открыто несколько медно-золото-

полиметаллических месторождений, включая медно-цинковое месторождение VMS, эпитермальное медно-золотое месторождение Хуншань, эпитермально-медно-золотое месторождение Хунши-Мейлинге и медно-золотое месторождение порфиров Юдай (рис. 1).

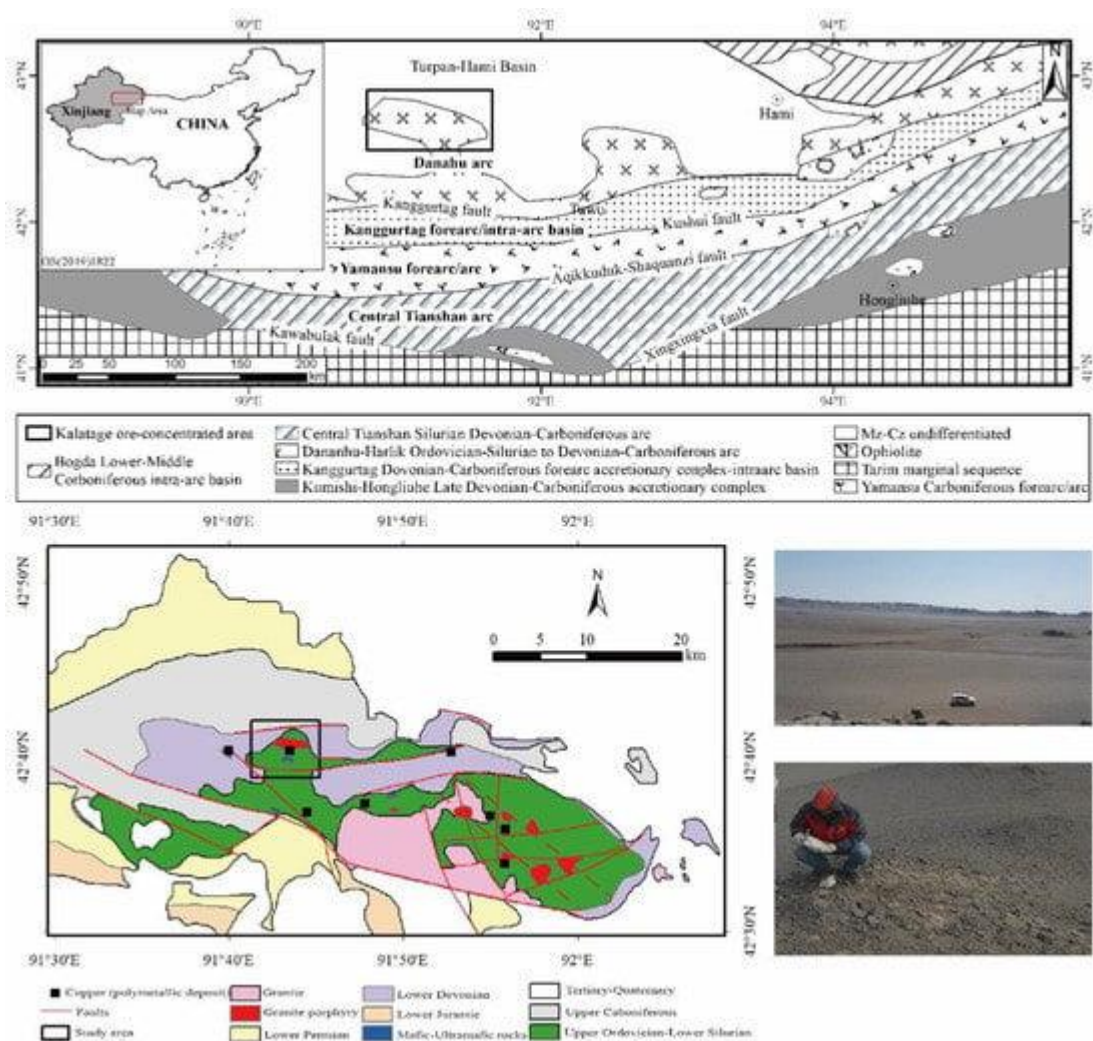


Рис. 1. Геологическая карта исследуемого района и типичный ландшафт

Широкие долины в районе исследования покрыты эоловым песком и аллювием, мощность которых колеблется от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Обрзцы были отобраны по тринадцати маршрутам север-юг, длина каждого из которых составляет 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 (ThermoFisherScientificNiton XL3t 950 GOLDD, 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 порошка горных пород все образцы были измельчены с диаметром частиц менее 75 мкм. Затем образцы каменного порошка были упакованы в полиэтиленовые пакеты (обратите внимание, что были протестированы пустые полиэтиленовые пакеты, чтобы убедиться в отсутствии загрязняющих веществ). Каждый образец был помещен на мобильный испытательный стенд. Применялись четыре максимальных времени обнаружения (40, 80, 120 и 200с). Каждый из четырех встроенных фильтров-возбудителей в спектрометре pXRF требовал четверти общего времени обнаружения для одного образца.

2.3. Лабораторный анализ.

Для точного определения концентраций элементов 316 образцов 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 табл. 1.

Табл. 1.

Список аналитического оборудования, используемого 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)

^(a) ICP-MS, inductively coupled plasma–mass spectrometry; ^(b) AFS, atomic fluorescence spectrometry; ^(c) ICP-OES, inductively coupled plasma–optical emission spectrometry; ^(d) TF, tube furnace method. To monitor the precision of the sample analysis method, four samples by the National Standards of the People’s Republic of China (GBW07305a, GBW07312, GBW07360, and GBW07361) were selected as standards in this study, and these standards were inserted into every fifty samples.

3. Результаты.

3.1. Анализ удобства использования pXRF.

При анализе время обнаружения было установлено равным 120с для образцов горных пород и 40, 80, 120 или 200с для образцов каменного порошка.

В общей сложности 35 элементов были идентифицированы с помощью pXRF при анализе 97 случайно выбранных образцов горных пород (рис. 2).

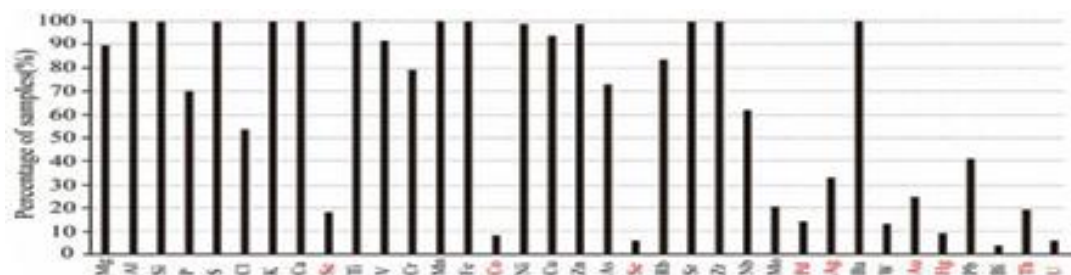


Рис. 2. Процент образцов горных пород, в которых элемент может быть обнаружен с помощью pXRF.

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).

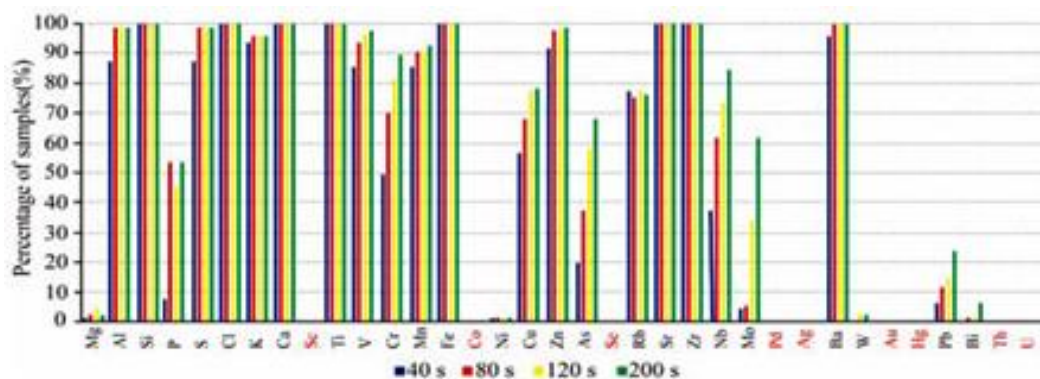


Рис. 3. Процент образцов каменного порошка, в которых элемент может быть обнаружен с помощью pXRF, на основе различного времени обнаружения.

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 возрастала. Результаты группы G3 также показали, что G3 содержит, возможно, три наиболее важных геохимических параметра 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. 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 и в таблице 2. Снижение аналитической ошибки было наиболее значительным, когда время обнаружения было увеличено с 40 с до 80

с, и существует экспоненциальная зависимость между временем обнаружения и аналитической ошибкой.

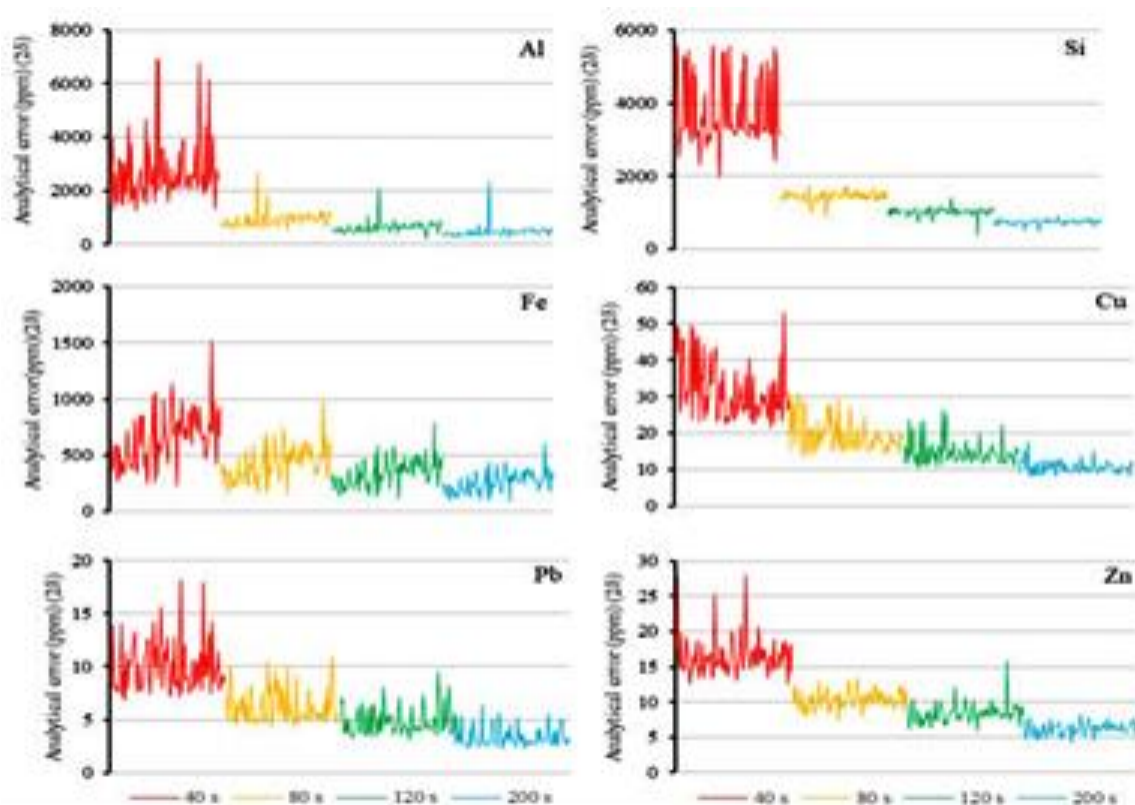


Рис. 4. Погрешность анализа образцов порошка методом рХRF, основанная на различном времени обнаружения.

Табл. 2.

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 40 с 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 рХRF

Для проверки результатов метода анализа на основе рХRF результаты образцов породы и каменного порошка были сравнены с результатами, полученными с помощью лабораторных

методов. Результаты для восьми распространенных элементов-индикаторов при поисках ПИ (т.е. мышьяка, меди, молибдена, никеля, свинца, серы, титана и цинка) показаны на рисунке 5.

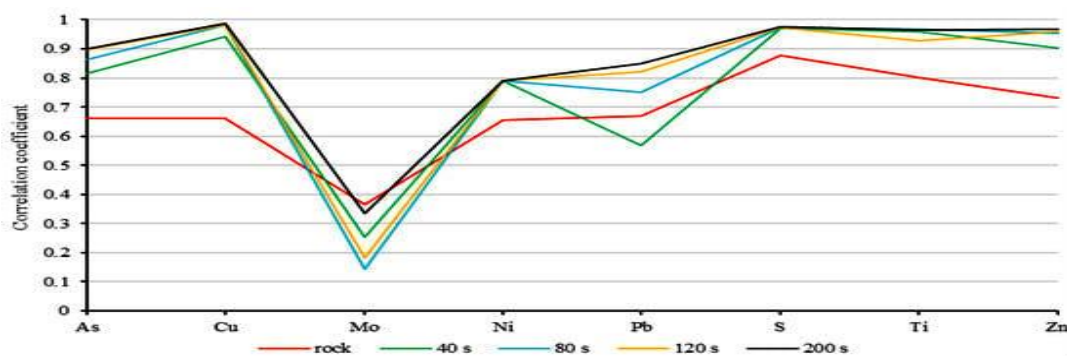


Рис. 5. Сходство результатов анализа рXRF и лабораторного 40с, 80с, 120с и 200с

Результат на рисунке 5 показывает, что достоверность концентраций с помощью анализа рXRF не была одинаковой для разных элементов, причем результаты для молибдена были наименее надежными. Это связано с тем, что концентрация молибдена, определенная с помощью рXRF, была неточной независимо от того, использовался образец породы или каменного порошка. Однако результаты, полученные с помощью рXRF 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 рXRF были случайным образом отобраны 32 образца каменного порошка, которые по отдельности были подвергнуты трем последовательным раундам анализа на основе рXRF. 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.

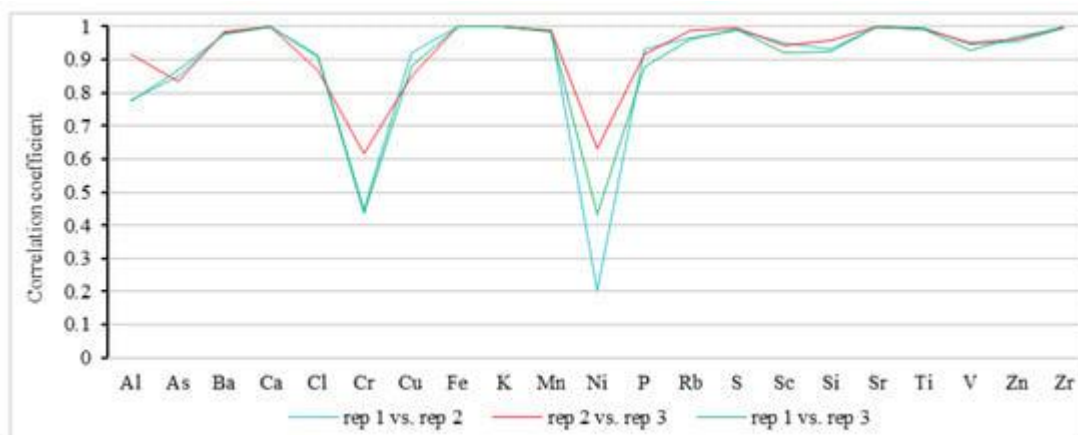


Рис. 6. Корреляция между различными повторными измерениями порошка горных пород методом рXRF.

4. Обсуждение.

4.1. Надежность pXRF.

Это исследование демонстрирует, что результаты применения pXRF для анализа подготовленных образцов (например, каменного порошка со средним диаметром частиц менее 75 мкм) могут быть сопоставимы с результатами, полученными с помощью лабораторного анализа. Другие факторы также могут влиять на результаты анализа на основе pXRF (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 pXRF, и результатов лабораторного анализа на мышьяк, медь, никель, свинец, серу, титан и цинк показало, что результаты, полученные с помощью анализов на основе pXRF, в целом были надежными, когда образцы были измельчены до 75 мкм, а время обнаружения pXRF составляло не менее 40 секунд. Что касается влияния времени, предыдущие исследования показали, что более длительное время обнаружения соответствовало результатам с более высокой точностью и меньшим количеством ошибок. Однако результаты этого исследования показали, что время обнаружения pXRF не обязательно должно быть очень большим, поскольку его чрезмерное увеличение снизит эффективность. Что еще более важно, для большинства элементов в пределах обнаруживаемого диапазона pXRF увеличение точности имеет тенденцию становиться менее значительным по мере увеличения времени обнаружения с 40с до 200с.

pXRF может сообщать о некоторых элементах (элементы, помеченные красным цветом на рис. 2) при использовании в образцах горных пород, которые не были указаны pXRF при использовании в образцах порошка горных пород (элементы, помеченные красным цветом на рис. 3). Хотя результаты анализа некоторых элементов (например, 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). В этом исследовании утверждается, что 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 перед анализом, что в точности соответствует практике, используемой в обычных работах по геохимическому анализу. Получение точных результатов анализа с использованием обычного геохимического анализа требует много времени и дорого. В отличие от традиционных методов, рXRF повышает эффективность и снижает затраты за счет точности анализа содержания элементов. Поэтому спектрометрия рXRF обычно считается качественным или полуколичественным аналитическим инструментом. Следует отметить, что результаты анализа рXRF действительно не так точны, как лабораторные анализы, но применение рXRF позволяет анализировать больше образцов, а большее количество данных может предоставить больше информации, что повышает надежность результатов анализа рXRF.

4.2. Геологическая значимость результата.

S, Zn, As и Cu — являются одними из важных индикаторных элементов при поисках ПИ. 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 в этом исследовании. Результаты демонстрируют, что содержание различных элементов, обнаруженных с помощью рXRF, отличается от результатов лабораторного анализа, но различные методы анализа образцов мало влияют на характеристики пространственного распределения элементов, особенно для S, Zn и Cu. На рисунке 7 трудно найти различия между результатами, полученными с помощью разных методов анализа образцов. Хотя легко найти различия между пространственными распределениями мышьяка, полученными различными методами анализа образцов, области с высоким содержанием As-рXRF и As-lab похожи (рис. 7).

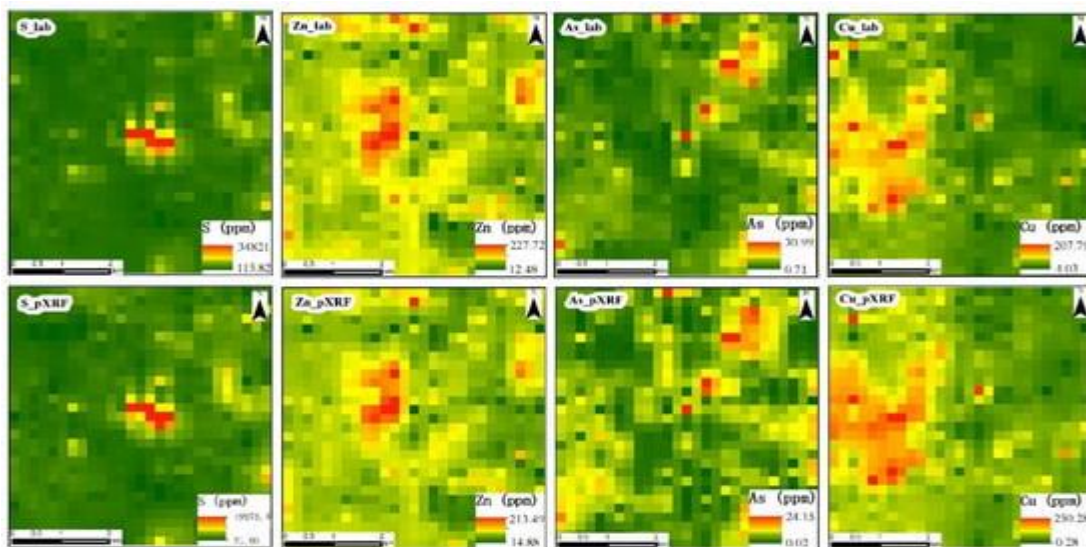


Рис. 7. Пространственное распределение S, Zn, As и Cu, представленное лабораторией (S_lab, Zn_lab, As_lab, Cu_lab) и рXRF (S_pXRF, Zn_pXRF, As_pXRF, Cu_pXRF).

При геохимических поисках ПИ более важно знать относительные концентрации элементов, чем получать очень точные значения элементов в разных регионах. Анализ на основе рXRF может дать надежные результаты, достаточные для определения относительных концентраций элементов в разных регионах (рис. 7). Таким образом, спектрометрия рXRF является надежным инструментом для поисков многих видов месторождений, которые могут быть обозначены As, Cu, Ni, Pb, S, Ti и Zn.

4.3. Последствия для дальнейшей работы.

Результаты по нескольким элементам (например, молибдену на рис. 5), представленные рXRF, ненадежны, но погрешность анализа имеет тенденцию к уменьшению с увеличением времени анализа. Содержание молибдена в большинстве образцов (98,81%) ниже, чем его содержание в континентальной коре Китая, согласно лабораторным данным. Следовательно, если содержание некоторых элементов, измеренное с помощью рXRF, 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.

Хотя во многих странах мира, включая Китай, проводились геохимические исследования национального масштаба, их недостаточно.

Во-первых, плотность отбора проб во многих выполненных проектах относительно низкая, что достаточно для выявления крупномасштабных геохимических аномалий, но не может соответствовать требованиям выявления мелкомасштабных геохимических аномалий и определения местоположения рудных месторождений.

Во-вторых, геохимические исследования не проводились во многих странах или регионах (например, в некоторых развивающихся странах или в бассейне Турфан-Хами, Джунгарской котловине и Таримской котловине в Синьцзяне, Китай).

Таким образом, в будущем все еще необходимо провести большой объем геохимических работ, и рXRF может быть использован следующими способами:

1. Геологи могут собирать как можно больше образцов в полевых условиях. Если производится сбор горных пород и ожидается достоверное содержание элементов, породы могут быть измельчены в каменный порошок; если собираются почвы или речные отложения, образцы могут быть высушены естественным путем и/или просеяны в соответствии с конкретным проектом, и рXRF может быть использован непосредственно на просто приготовленных образцах без необходимости переваривания, ламинирования или плавления.

2. Также можно отобрать относительно небольшое количество образцов для точного анализа на основе результатов анализа рXRF, избегая слепой передачи всех образцов для анализа профессиональным лабораториям. Каждому из четырех встроенных фильтров-возбудителей в спектрометре рXRF требуется одинаковое количество времени для детектирования; однако исследователи и геологи могут выбрать только один, два или три встроенных фильтра-возбудителя по мере необходимости для дальнейшего повышения эффективности.

5. Выводы.

1. рXRF можно использовать для качественного анализа образцов горных пород непосредственно на некоторые элементы, особенно на элементы с относительно высоким содержанием в отобранных образцах. Некоторые результаты ненадежны, когда рXRF используется в образцах анизотропных горных пород. Это исследование показало, что результаты рXRF ненадежны или сомнительны при использовании образцов горных пород, если элемент может быть обнаружен только менее чем в 30% от общего количества образцов.

2. Хотя абсолютной точности анализа может быть недостаточно, общие тенденции результатов, полученных с помощью рXRF, соответствовали тем, которые наблюдались с помощью лабораторного анализа. Результаты рXRF для подготовленных образцов были сопоставимы с результатами, полученными с помощью лабораторного анализа для многих элементов в обнаруживаемом диапазоне рXRF. Поэтому рекомендуется включать этап предварительной обработки (т. е. сушку, просеивание и/или измельчение) для улучшения анализа данных и расширения применимости рXRF-спектрометрии.

3. Было обнаружено, что стабильность спектрометрии рXRF была высокой, когда она применялась к элементам с высоким содержанием в подготовленных образцах. Для большинства элементов в обнаруживаемом диапазоне рXRF более длительное время, 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 120 с для образцов порошка.

4. Спектрометрия рXRF - это недорогая и эффективная технология, которая может быть использована для определения концентраций десятков элементов в образцах каменного порошка. Таким образом, рXRF является практичным оборудованием для геохимических поисков.

III. ESCORE: НОВЫЙ БЫСТРЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СКАНЕР КЕРНА МИНЕРАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ [4].

1. Введение.

ГРР на дефицитные элементы, нуждается в датчиках нового типа. Дефицит и растущее потребление редких элементов в электронике, системах хранения энергии и каталитических нейтрализаторах, среди прочего, требуют новых методов ГРР элементов платиновой группы (PGE). Обнаружено, что континентальные источники PGE примерно в 10 000 раз более концентрированы в массивных сульфидах, чем в самородных рудах. Поскольку химический состав массивных сульфидов необходимо определять с помощью элементного анализатора, ГРР остро нуждаются в быстрых сканерах керна.

Метод гиперспектральной визуализации (HSI) повысил эффективность ГРР. По определению, гиперспектральный тепловизор присваивает один обнаруженный спектр одному месту анализа. Таким образом, созданный гиперкуб (т.е. X_Yλ) подвергается дальнейшей обработке путем выбора интересующих длин волн и кодирования их в формат RGB (т.е. ложный цвет), где точки анализа представлены пикселями. В настоящее время термин HSI часто используется только для обозначения метода гиперспектральной визуализации с инфракрасным диффузным отражением (IR-HSI) из-за удаленных приложений инфракрасного зондирования по умолчанию, хотя многие другие спектроскопические методы также являются инструментами HSI (например, спектроскопия лазерно-индуцированного пробоя (LIBS), рамановская спектроскопия, масс-спектрометрия связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) и т.д.). Метод IR-HSI в контексте картирования минералов представляет собой метод гиперспектральной визуализации с точечным сканированием. Ширина луча источника света регулируется до небольшого диаметра, а спектр рассеянного отражения определяется для каждой сканируемой области, чтобы получить очень подробные данные. Этот метод отличается от других, таких как линейное сканирование или сканирование площади гиперспектральной визуализации, используемых, например, для приложений дистанционного зондирования, где взаимодействие света на больших площадях сразу обнаруживается детектором стационарной камеры.

IR-HSI являются наиболее распространенными сканерами керна буровых скважин предоставляющими большой объем информации о минералах. Большинство ИК-HSI, таких как CSIRO HySpex и SPECIM Sisurock, могут выполнять линейное сканирование со скоростью, достигающей примерно 50 мм/с при низком разрешении. Инфракрасные детекторы стали более доступными, а источники света инфракрасного диапазона довольно дешевы. К сожалению, ни

один источник света не охватывает весь инфракрасный спектральный диапазон, может потребоваться много источников. Например, полевой шпат поглощает инфракрасные фотоны в длинноволновом диапазоне (LWIR), в то время как эпидот - в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR). Если для анализа необходим сигнал от обоих минералов, то в приборе необходимо объединить два источника света. При каждом анализе необходимо учитывать время выдержки каждого источника, что отрицательно сказывается на общей скорости анализа. Например, сообщается, что время задержки SWIR камер SPECIM составляет около 2,5 мс (400 кадров в секунду (fps)), а время задержки камер LWIR SPECIM HS составляет около 8 мс (120 кадров в секунду). Кроме того, поглощенные фотоны в инфракрасном диапазоне соответствуют колебаниям молекул, поэтому сплавы и металлы отражают большинство инфракрасных излучений (например, золото, электрум, Pd, Pt и т.д.). Наличие самородной руды можно определить косвенно, используя сигнал инфракрасного отражения, ограничивая избирательность и точность результатов. IR-HSI доказал свою эффективность, например, для сканирования керна россыпного золота, даже несмотря на то, что самородные руды невозможно обнаружить непосредственно с помощью инфракрасного излучения. Кроме того, оксиды металлов и сульфидные минералы также не обнаруживаются с помощью инфракрасной спектроскопии диффузного отражения, что является проблемой для рассеянных ценных элементов (например, Pd, Pt, Au, Ag, Cu и т.д.). Кроме того, IR-HSI не может отобразить истинный химический состав образцов: оценить их можно только путем сравнения со спектральными базами данных. Например, анализ выделения сульфидов, содержащих элементы PGE, не может быть выполнен непосредственно с помощью ИК-HSI, поскольку градиенты концентрации различаются в разных местах.

Для определения химического состава часто предлагаются методы рентгенофлуоресцентного сканирования (XRF). Пропускная способность рентгенофлуоресцентных анализаторов является проблемой, поскольку сам метод рентгенофлуоресценции основан на многих зависящих от времени параметрах, таких как время экспозиции в диапазоне 1-100с. Пропускную способность можно повысить, значительно снизив разрешение за счет увеличения ширины луча источника рентгеновского излучения. Этот метод был опробован на сканере керна Minalyze. Метод Minalyze заключается в облучении образца рентгеновским пучком, коллимированным в прямоугольную форму размером 1×20 мм. Сканирование выполняется с шагом обычно 10 см для достижения заявленной скорости 1 см/с. Таким образом, этот метод является методом линейного рентгеновского сканирования (SXRF), поскольку прибор не создает никаких изображений (линейное или точечное сканирование), а сообщает только о содержании элементов. Основным недостатком SXRF-анализа является его

неспособность составить карту минералов: таким образом, система Minalyze является системой каротажа керна. Любая рентгеновская система также не способна обнаруживать легкие элементы со слабым Z-числом (т.е. меньше 13); Mg ($Z = 12$) и Na ($Z = 11$) могут быть обнаружены, но время выдержки непрактично для применения. Кроме того, помехи зависят от времени экспозиции, поэтому для надежного определения эффективного диапазона элементов требуется значительная и тщательная настройка времени экспозиции, что затрудняет разработку точного метода.

Устранить эти неизбежные недостатки можно, объединив несколько сенсорных систем. Например, системы Geotek настраиваются в соответствии с потребностями проекта. ИК-HSI датчики можно комбинировать с портативными рентгеновскими снимками, измерениями скорости Р-волны, магнитной восприимчивости и так далее. Еще одна система - SXRF в сочетании со спектроскопией лазерно-индуцированного разрушения (LIBS) в сканерах керна Avaatech. В этой системе используется анализатор Spectral Industry LIBS с низкой скоростью сбора данных (20 измерений в секунду) для проведения химических анализов на легкие элементы.

В настоящее время используются возможности LIBS (LIBS-HSI), обработанные алгоритмами машинного обучения, для создания карт минералов. Время выдержки обычно составляет от 0,01 до 1с. Результирующая скорость сканирования (т. е. от 1 до 100 Гц) является проблемой, особенно когда речь идет о сканировании тысяч метров керна. Было продемонстрировано создание карт минералов с использованием анализатора CORIOSITY LIBS-HSI с пространственным разрешением 50 мкм и скоростью сканирования 1 кГц. В ходе этого исследования из керна, содержащего PGE, были вырезаны три небольших диска (шахта Стиллуотер, Най, Массачусетс, США), которые затем были проанализированы сначала с помощью сканирующего электронного микроскопа - энергодисперсионной спектроскопии (SEM-EDS). Анализатор TIMA-X и второй с использованием CORIOSITY. Карта минералов CORIOSITY была составлена на основе контрольной карты TIMA-X. Библиотека минералов, созданная с использованием трех упомянутых выше дисков, была применена для определения карты минералов двух пород, содержащих PGE (шахта Лак-де-Иль, Тандер-Бей, Онтарио, Канада). Результаты были подтверждены с использованием метода микро-рентгенографии, и в обоих случаях были достигнуты схожие результаты.

Описанный ранее метод калибровки под контролем SEM-EDS был протестирован для получения полной минеральной карты полного лотка керна на руднике Стиллуотер, Биллингс, Маунтин, США. Впервые сообщается о надежности новой полностью автоматизированной системы LIBS частотой 1 кГц для всех размеров лотков, для которых спектральный диапазон

был заполнен и увеличен до полного диапазона 220-990 нм. Новый E CORE может сканировать лоток для керн (т. е. около 4 м) менее чем за 5 минут, создавать минеральные и химические карты с репрезентативным разрешением, предоставлять оптические фотографии высокого разрешения и определять качество породы, а также физические свойства всего лотка. Основным новшеством является высокая пропускная способность E CORE, которую можно настроить для получения изображения текстуры, размера зерен и анализа минералов при каротаже керн. Кроме того, оптическая конфигурация была значительно улучшена для охвата полных спектров излучения от 220 нм до 990 нм, включая линию излучения натрия (низкой концентрации) при 589 нм, а также для обнаружения серы при 921 нм. Ранее отсутствие этой спектральной информации не позволяло отличить второстепенную минеральную фазу цоизита ($\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$) от основной минеральной фазы байтаунита ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$). Кроме того, включение сигнала серы повышает селективность при различении массивных сульфидов и оксидов. Например, мегапиксельное сканирование LIBS заняло бы 88 дней (четверть года) вместо 2 часов сканирования с помощью E CORE. E CORE является новым, инновационным высокоуровневым эталоном для производства приборов сканирования керн скважин на основе LIBS.

2. Методология.

Керн диаметром 40,7 мм (Стиллуотер, Биллингс, Массачусетс, США) был помещен в стандартный лоток. Три образца были вырезаны, отполированы, покрыты углеродом и проанализированы с помощью встроенного анализатора минералов SEM-EDS TESCAN (TIMA-X) (рис. 1).



Рис. 1. Изображение с высоким разрешением (57 мкм/пиксель) лотка керн, на котором красные кружки соответствуют участкам, проанализированным с помощью анализатора SEM-EDS.

Все эксперименты LIBS проводились с использованием анализатора керн LIBS E CORE производства ELEMISSION Inc. (Монреаль, QC, Канада). E CORE analyzer - это полностью автоматизированный прибор для сканирования керн, который объединяет в себе электронику, лазерный источник, спектрометр, 2-осевую таблицу перемещения керн и камеру абляции. Эта система также оснащена системой 3D лазерного профилирования, гарантирующей

расположение образца в фокальной плоскости (минимальный размер пятна) в диапазоне менее 30 мкм, что обеспечивает оптимальное расположение зоны Рэлея 6 мм (глубина резкости). Кроме того, оптическая камера высокого разрешения и светодиоды высокой интенсивности позволяют быстро и с высокой точностью отображать полный лоток керн для добавления к изображениям, созданным LIBS (рис. 2).



Рис. 2. Сканер керн ECORE LIBS.

Излучение плазмы, вызванное лазером, регистрируется стандартными ахроматическими линзами, что гарантирует минимальное цветовое смещение по всему спектру. Следовательно, повышается чувствительность в широкой полосе пропускания. Затем оптический сигнал подвергается спектральному разрешению с помощью оптического спектрометра с длиной волны от 220 до 990 нм. Спектрометр оснащен CMOS -детектором, который управляется сверхбыстрой электроникой. Уникальная электроника позволяет снимать с камеры 1000 полных кадров в секунду. Анализатор ECORE может обрабатывать лотки любых размеров длиной до 1,5 м и шириной 0,4 м. Пользователь должен загрузить/выгрузить лоток для керн, все остальное автоматизируется с помощью управляющего программного обеспечения ECORE (ELEMISION Inc., Монреаль, QC, Канада). ECORE обладает уникальным сверхбыстрым способом обработки данных и выдает результаты менее чем за 5 минут после завершения сканирования кернового блока. После этого многоэлементные анализы, количественная автоматическая минералогия, плотность породы, твердость породы, обозначение качества породы (RQD), изображение RGB с высоким разрешением и многое другое доступны для передачи в программное обеспечение для геологического моделирования.

Анализ LIBS проводился на участке шириной 2 см вдоль лотка с PGE, содержащего керн BQ, которые соответствуют примерно 55% диаметра керн.

Сгенерированные гиперспектральные данные LIBS обрабатываются в режиме реального времени, что приводит к созданию автоматических минералогических карт на основе

библиотеки минералов LIBS, созданной на основе данных ТИМА-Х. В начале процесса сканирования пользователь выбирает различные выходные данные, генерируемые программным обеспечением в зависимости от глубины скважины (например, желаемые элементные анализы (% по массе/w), список минералов и т.д.).

3. Обсуждение.

В соответствии с содержанием элементов и изображением ТИМА-Х спектры LIBS трех образцов керна были отнесены к классам минералов. Средние спектры LIBS для каждого класса ТИМА-Х показаны на рисунке 3.

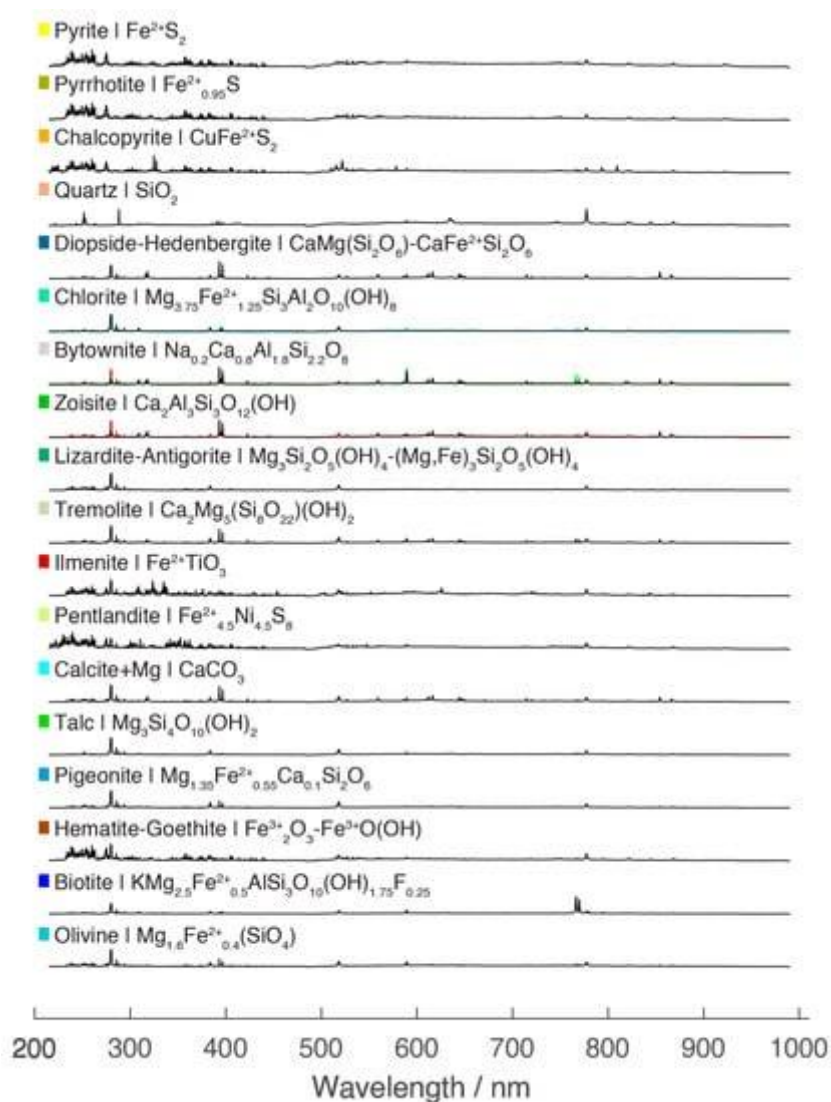


Рис. 3. Спектры классов минералов в диапазоне 220-990 нм.

Все классы ТИМА-Х были отнесены к спектру LIBS, за исключением минералогии магнево-роговой обманки. С помощью анализатора ТИМА-Х было обнаружено очень мало зерен магнево-роговой обманки, и поскольку образцы содержат много минералогических

элементов, содержащих Al, Si и Ca, для этой минералогии нельзя было с уверенностью определить “чистый” спектр. Все спектры были сопоставлены с данными ТИМА-Х на основе первых наблюдений, а затем тщательно проверены с помощью LIBS на содержание элементов на основе определения химического состава минералов. Образцы зерна подвергались абляции несколько раз после анализа ТИМА-Х. Хотя объем удаляемого вещества с использованием технологии EMISSION LIBS очень мал (т.е. глубина <15 мкм×диаметр 50 мкм), изображения различных слоев могут немного отличаться. Это произошло для минералогии ильменитов где определение было основано только на содержании Ti в ильмените. Содержание биотита не было определено, поскольку он содержится только в образце зерна А. Отчетливо видны два пика К при 766 и 770 нм. Сигнал ионной эмиссии Mg при 279 нм и других элементов очень высок благодаря технологии LIBS. Таким образом, минералогические образцы, содержащие только оксиды железа, такие как гематит, или оксиды-гидроксиды железа, такие как гетит, имеют сложные спектры до 400 нм, в то время как минералогические образцы оливина и пигеонита имеют, по-видимому, более низкий сигнал железа при построении в аналогичном масштабе. Все эти тонкости были учтены при создании библиотеки минералов с использованием программного обеспечения ECORE.

Ни один из отдельных классов минералов не является чистым (микроэлементы могут кристаллизоваться/быть захвачены кристаллографической сеткой), как это видно для класса кальцита. Его назначение основано на богатой Ca жилке в образце зерна А, но присвоенный класс также содержит Mg. Поскольку этот минералогический состав является второстепенным компонентом лотка зерна, его примесь имела низкое значение, но для создания более обширной базы данных спектры чистого кальцита пришлось бы определять на основе образца с более высоким содержанием. Пробел в спектральном диапазоне был заполнен для сбора сигнала натрия при 589 нм, что позволяет различать минералогию байтаунита и цоизита, как видно на рисунке 4.

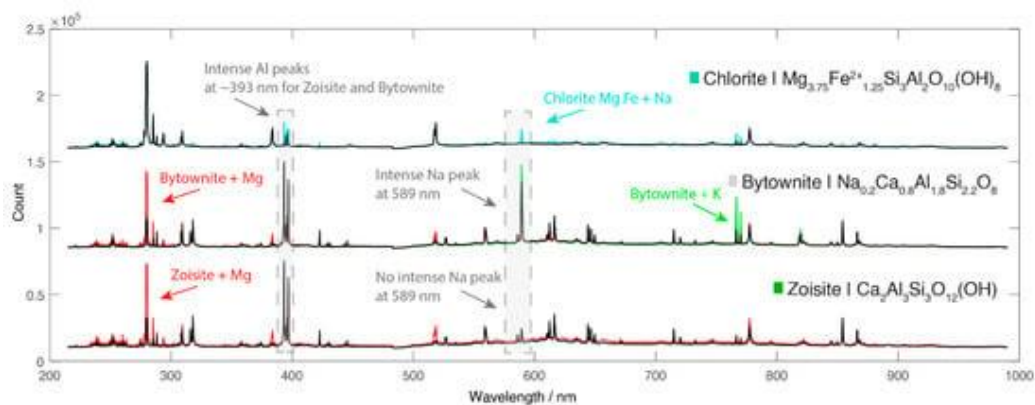


Рис. 4. Полные спектры хлоритов и хлорит-Mg Fe + Na, байтаунита, байтаунита + Mg и байтаунита + K, а также минералогий, присвоенных цоизиту и цоизиту + Mg.

Таким образом, содержание Na в элементах сыграло важную роль в определении класса прибора ESCORE. Поскольку эти минералогии являются основными компонентами, были присвоены различные подклассы, такие как байтаунит + K, байтаунит + Mg и цоизит + Mg. На изображении ТИМА-Х с более высоким разрешением в этих классах мелко распределены другие минералогии, поэтому эти минералогии были присвоены для улучшения качества минералогической карты. Эти определения были сделаны на основе того факта, что все эти подклассы имеют очень интенсивный сигнал Al при ~ 393 нм. В будущем для решения проблем со смешанными минералами можно было бы использовать многоклассовый классификатор, но поскольку приложения для сканирования зерна требуют сбора и анализа большого объема данных, скорость алгоритма является ключевой. Таким образом, исходные данные всегда могут быть переработаны по запросу для решения конкретных проблем со смешанными минералами.

Образец зерна А содержал много изменений в хлорите, Mg Fe, что позволило получить спектр хлорита, Mg Fe, а также спектр хлорита, Mg Fe, обогащенный Ca (голубым цветом на рис. 4). Поскольку сигнал Al немного выше в голубом спектре, при точечном анализе могло содержаться некоторое количество байтаунита, но на изображении ТИМА-Х зона была отнесена к хлориту Fe Mg.

Еще одним усовершенствованием является более широкий спектральный диапазон - до 990 нм. Это усовершенствование сделало возможным получение сигнала серы при 921 нм, как показано на рисунке 5. Железосодержащие сульфиды, такие как пирит и пирротин, например, было трудно отличить от оксидов-гидроксидов железа, таких как гематит-гетит, но теперь это не так.

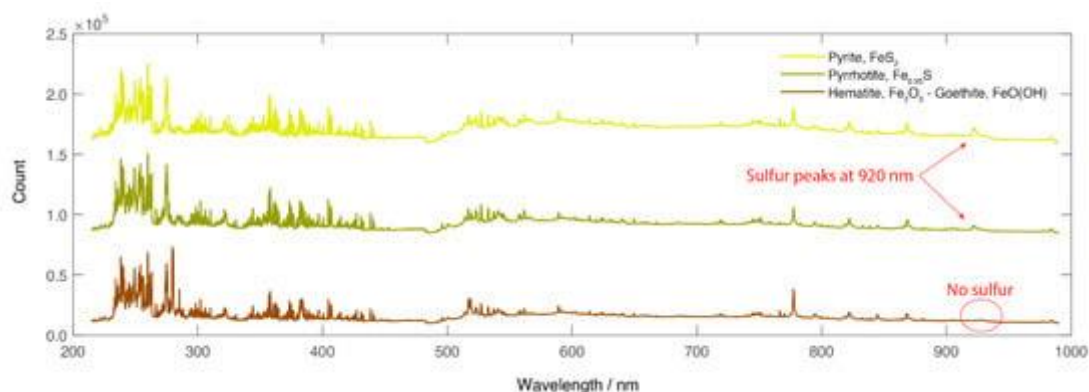


Рис. 5. Полные спектры пирита (желтого), пирротина (зеленого) и гематит-гетита (коричневого) с присвоенными минералогическими характеристиками.

После назначения класса на рисунок 6 были добавлены подробные изображения образцов зерна А, В и С с разрешением 50 мкм. Все три изображения соответствуют изображениям ТИМА-Х.

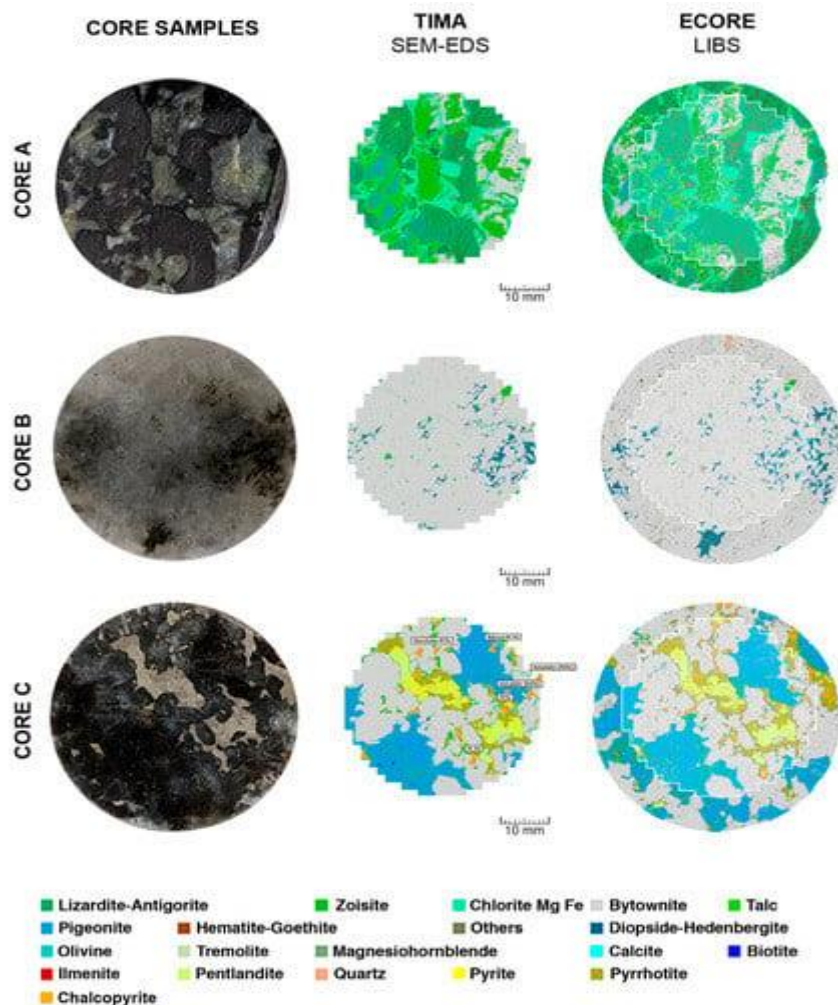


Рис. 6. Минеральные карты ТИМА-X и ECORE образцов керн А, В и С (красные кружки на рис. 1).

В керне А области цоизита содержат больше пикселей, присвоенных байтауниту, чем на изображении ТИМА-X, особенно когда они окаймлены изменениями хлорита. Спектры этих пикселей содержат высокий сигнал Na. Независимо от того, содержат ли эти пиксели смешанную минералогию или поверхность изменилась после нескольких удаленных слоев, алгоритм сбив с толку этим сильным сигналом Na. Многоклассовый классификатор может разрешить неверное назначение пикселей смешанных минералов. Гематит–гетит также мелко рассеян в лизардите–антигорите, поэтому на изображении LIBS эти прожилки также выглядят крупнее, чем на изображении ТИМА, очевидно, из-за разницы в пространственном разрешении. Цоизит Core В отлично соответствует изображению ТИМА-X, а также диопсид-геденбергиту и кварцу. В байтауните на изображении ТИМА-X многие минералогические элементы распределены очень мелко. Это объясняет, почему на изображении LIBS не выделено много пикселей. На практике это не проблема, поскольку эти минералы помечены как пустая порода. Наконец, изображение образца керн С демонстрирует явные отличия от изображения ТИМА-X из-за того, что после анализа ТИМА-X было удалено несколько слоев. Например, большое

скопление пирротина теперь видно над скоплением халькопирита, немного выше середины образца зерна. Имея это в виду, части цоизита в этом образце зерна определены не так четко, как в других образцах зерна. При повторном просмотре спектров в этих областях пиксели, которые следует отнести к цоизиту, содержат много натрия. Следовательно, поскольку цоизит является второстепенным компонентом в этом образце зерна, распределение было оставлено как есть.

После присвоения класса и валидации ESCORE проанализировал полный лоток зерна из четырех рядов зерна BQ толщиной около 1 м и общей протяженностью 3,8 м с пространственным разрешением 50 мкм и шагом (эффективное пространственное разрешение) 100 мкм. Карты, накладываемые на фотографию лотка зерна с высоким разрешением, показаны на рисунке 7. Прибор автоматически предотвратил образование крупных трещин, и весь процесс полностью автоматизирован.

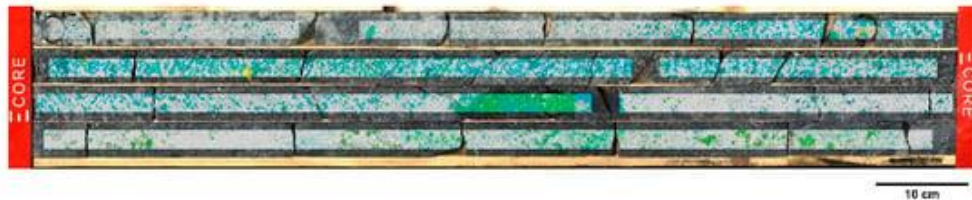


Рис. 7. Отображение минералов LIBS в лотке для зерна с пространственным разрешением 50 мкм и размером шага 100 мкм накладывается на изображение лотка для зерна с высоким разрешением.

Образцы зерна А, В и С были помещены обратно в отверстия перед анализом для сравнения, и результаты хорошо согласуются с картой с шагом 50 мкм на рисунке 6.

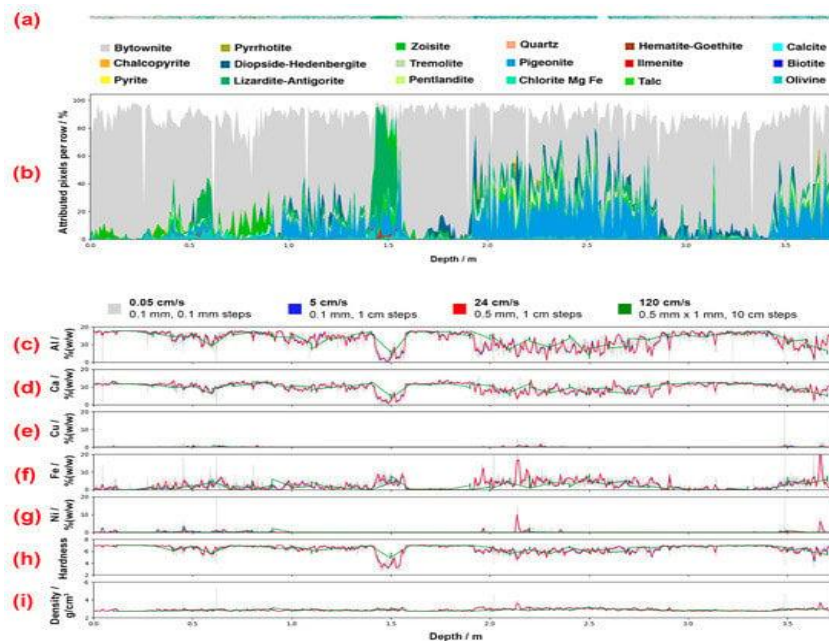


Рис. 8. (a) Минеральная карта всего зерна в лотке, (b) содержание минералов в% в зависимости от длины зерна с шагом 10 мм, (c–g) элементный анализ, (h) твердость и (i) плотность. Скорость сканирования составляет 0,05 см/с (серый, с шагом 0,1 мм), 5 см/с (зеленый, с шагом 10 см), 5 см/с (синий, с шагом 1 см) и 24 см/с (красный, с шагом 1 см) по оси глубины.

Результаты минералогического картирования на рисунке 8а были нанесены в виде графиков на рисунке 8b для сравнения нанесенных на график концентраций элементов, твердости и плотности на рисунке 8с–і. Полная карта минералов керна толщиной 3,8 м представлена на рисунке 8а, а минералогическое содержание, выраженное с шагом 10 см, на рисунке 8b представлено в качестве ориентира. На рисунке 8b содержание выражено в%, таким образом, следует понимать, что алгоритм распознает от 80% до 95% классов на каждом этапе. В конечном итоге не все точки анализа были назначены в основном из-за шероховатости и неоднородностей образцов керна; другими словами, некоторые лазерные точки находились за пределами глубины резкости, что приводило к отсутствию плазмы, индуцируемой лазером.

На рисунке 8с–g представлены химические анализы в % (*мас./мас.*) содержания Al, Ca, Cu, Fe и Ni соответственно в зависимости от глубины скважины. Для наглядности нанесены на график только некоторые элементы, но можно было бы нанести и любой другой анализ. На рисунке 8h, і твердость по шкале МЗ и плотность в г/см³ нанесены как среднее значение значений, приведенных в литературе по минералогии, соответственно.

Для всех графиков водопада, представленных на рисунке 8с–і, показатели твердости и плотности нанесены на график в соответствии со скоростью сканирования 0,05 см/с (серый), 5 см/с (синий), 24 см/с (красный) и 120 см/с (зеленый). Все линейные графики хорошо согласуются с минералогическим содержанием лотка на разных глубинах. Например, содержание алюминия (рис. 8с) высокое при заполнении лотка, за исключением случаев, когда содержание алюминия в лизардите-антигорите составляет около 1,5 мкм (рис. 8b). Кроме того, содержание Ni достигает максимума на глубинах, где содержание пентландита высокое, на отметках 2,15 и 3,6 м, что вполне ожидаемо.

Синяя и зеленая линии очень похожи и отражают среднее значение серой линии с более высоким разрешением. На практике разрешение 0,1 мм не требуется, и, таким образом, снижение разрешения до 0,5 мм с шагом 1 см значительно увеличивает скорость сканирования при сохранении той же информации о керне. Скорости рассчитываются исходя из номинальной скорости 1 мс/пиксель. Увеличение до 10 см по-прежнему обеспечивает стабильные результаты при гораздо более высокой скорости - 120 см/с. Такой метод отбора проб используется, например, для каротажа керна и методов SXRF для компенсации длительного времени выдержки.

IR-HSI был самым быстрым методом каротажа и сканирования керна, но сам метод имеет ограничения. Одним из этих ограничений является то, что метод не может отображать содержание элементов (т. е. многоэлементные анализы) в качестве инструмента проверки, но, что более важно, сам ИК-сигнал недостаточно селективен для дифференциации определенных

минералогий, потому что некоторые химические связи просто не поглощают инфракрасные фотоны (например, сульфиды, оксиды и т.д.). Время задержки рентгеновской флуоресценции составляет >2 -3с, и помехи для каждого элемента в значительной степени зависят от этого времени задержки. Таким образом, скорость сканирования керна SXRF, несомненно, снижена. Однако в аспекте каротажа керна производители приборов SXRF внесли множество улучшений, достигнув для определенных методов скорости каротажа 1 см/с. В таблице 1 показано сравнение параметров LIBS с методами IR-HSI и fast SXRF, оба из которых прошли экспертную оценку.

Табл. 1.

Сравнение параметров LIBS с IR-HSI (низкоскоростной ИК-анализ) и с SXRF (высокоскоростной SXRF каротаж керна) параметрами.

Technique	Core Scanning/Logging Technique		
	IR-HSI	SXRF	LIBS-HSI
Analysis type	Hyperspectral imaging	Elemental content	Hyperspectral imaging and elemental content
Instrument in peer-reviewed article	SisuROCK AisaFENIX (VNIR-SWIR)	Minalyze CS	ECORE ELEMISION
Resolution [†] , step size, analysis time reported by manufacturer	65–560 μm , ≥ 65 –560 μm , up to 50 mm/s	1 mm/2 cm, 0.1 m, 1 cm/s	50 μm , ≥ 50 μm , 1 pixel/ms
Spatial resolution (beam width)	\varnothing 1.5 mm/pixel	1 mm/2 cm [13]	\varnothing 50 μm
Step size	1.5 mm/pixel	0.1 m	500 μm
Real spatial resolution	1.5 mm/pixel [22]	0.1 m [13]	500 μm
Dwell time	4 ms (VNIR) [22] 15 ms (SWIR) [22]	10 s [13]	1 ms
Reported analysis speed	25.06 mm/s [22]	1 cm/s [13]	1 pixel/ms
Analysis speed at 10 cm steps	14 pixels in 1 mm/2 cm >13 cm/s	1 cm/s	82 pixels in 1 mm/2 cm 120 cm/s

[†] The resolution used for the SXRF technique is the beam width provided by Sjöqvist et al. [13].

Все производители рассчитывают скорость по-разному, что приводит к путанице при сравнении, особенно при разном разрешении. В таблице 2 указана скорость IR-HSI и скорость анализа LIBS, переведены в разрешения, сопоставимые с методом каротажа керна SXRF.

Табл. 2.

Основные параметры анализа Ecore LIBS.

Laser Energy	1 mJ/Pulse
Laser source wavelength	1064 nm
Acquisition rate	1000 Hz
Spatial resolution	50 μm
Rayleigh zone (depth of field)	6 mm
Working distance (optical window-sample surface)	250 mm
Dwell time	1 ms
Step size (adjustable)	0.1 mm
Core width to be scan (adjustable)	20 mm
Drill core length	3.81 m
Surface analyzed	762 cm ²
Number of pixels (LIBS)	7.62 megapixels
Total duration	2.1 h
Scanning speed in real-time	1 pixel/ms

После рассмотрения этой области в SXRF описывается шаг 10 см и сообщается о скорости сканирования 1 см/с. При разрешении метода IR-HSI в том же эксперименте скорость сканирования составила бы около 13 см/с. Конечно, ширина луча ИК-HIS камер может быть увеличена для приложений каротажа керна, чтобы повысить скорость визуализации в таких условиях. Таким образом, значение, оцененное в таблице 2, служит для определения местоположения скоростей SXRF и LIBS. Считыватель должен иметь в виду, что это минимальное значение. Чтобы охватить ту же схему выборки размером 1×20 мм, анализатор LIBS должен охватывать 82 пикселя при разрешении 0,5 мм. При использовании шага 10 см скорость прибора LIBS может достигать около 120 см/с, что выше, чем при описанном анализе SXRF. Таким образом, основываясь на анализе одной и той же области и, следовательно, сравнивая аналогичные эксперименты, эксперимент LIBS-HSI, безусловно, заслуживает рассмотрения как для экспериментов по сканированию керна, так и для каротажа керна, поскольку он сочетает автоматизированную количественную минералогия и многоэлементные анализы в одном измерении. 2,1 часа, указанные в таблице 2 для сканирования всего лотка, позволяют получить информацию, сопоставимую со временем анализа TIMA-X (SEM-EDS) для одного диска диаметром 25 мм. Другими словами, за заявленное время сканирования одного полного 25-миллиметрового диска с помощью TIMA-X ECORE отсканировала полный ящик с керном 3,81 м. На практике, когда необходимо отсканировать несколько километров керна, используется режим низкого разрешения, что сокращает время полного сканирования лотка с керном до 5 минут. Режим низкого разрешения ECORE эквивалентен большинству ИК-HSI сканеров керна (т. е. размер пикселя 500 мкм). Одним из преимуществ аналитических возможностей ECORE является гибкость настройки разрешения сканирования в зависимости от содержания минералов в лотке. Другими словами, ECORE может быстро проводить поиск с низким разрешением и при необходимости получать более ценную информацию о минералах с высоким разрешением. Таким образом, ECORE сочетает в себе высококачественную автоматизированную количественную минералогия и высокий уровень автоматизации.

Сравнение универсальности прибора ECORE, типы анализов, выполняемых методами IR-HSI, SEM-EDS, SXRF и LIBS, представлены в таблице 3.

Ограничения метода IR-HSI показаны здесь на примере сульфидов (минералов, содержащих PGE), которые невозможно диагностировать. С помощью этого метода невозможно определить содержание пентландита, содержащего PGE, и, следовательно, элементов PGE. Для других методов выдается хороший сигнал, если методы могут сообщить тип анализа.

Сравнение трех типов сканеров керна (IR-HSI, SXRF и LIBS) и устройства формирования изображений высокого разрешения SEM-EDS.

Core Scanning Technique						
Technique		IR-HSI (e.g., SisuROCK, HySpex, etc.)	SEM-EDS (e.g., TIMA)	SXRF (e.g., Minalyze CS, ITRAX, etc.)	LIBS-HSI (e.g., ECORE)	
Sample sizes		Drill core trays	Small core cross-sections	Drill core trays	All types	
Elemental assay		Diagnostic (good or non-diagnostic)				
Light elements (H-Mg)		ND	Diagnostic	ND	Good	
Other elements (Al-Lr)		ND	Diagnostic	Good	Good	
Mineral structure	Mineral group	Example	Diagnostic (poor, moderate, good or non-diagnostic)			
Ino-silicates	Pyroxene	Diopside	Good (VNIR, LWIR) [7] Moderate (SWIR) [7]	Good	ND	Good
		Pigeonite	Good (VNIR, LWIR) [7] Moderate (SWIR) [7]	Good	ND	Good
Soro-silicates	Epidote	Zoisite	Good (SWIR) [7,22] Moderate (LWIR) [7,22]	Good	ND	Good
Phyllo-silicates	Chlorite	Fe/Mg-Chlorite	Good (SWIR) [7,22] Moderate (LWIR) [7,22]	Good	ND	Good
	Mica	Talc	Good (SWIR) [7] Moderate (LWIR) [7]	Good	ND	Good
Tecto-silicates	Feldspar	Bytownite	Good (LWIR) [22]	Good	ND	Good
	Silica	Quartz	Good (LWIR) [7,22]	Good	ND	Good
Non-silicates	Oxides	Hematite	Good (VNIR) [7,22]	Good	ND	Good
	Sulfides	Pyrite	Moderate (LWIR) [22] ND [7]	Good	ND	Good
		Chalcopyrite	ND [7]	Good	ND	Good
		Pentlandite	ND [7]	Good	ND	Good

Метод SEM-EDS, подобный тому, который используется в качестве инструмента проверки в этой статье, позволяет определить содержание минералов с очень высоким разрешением, но его нельзя использовать для сканирования керна или каротажа, поскольку время выдержки слишком велико. Элементные анализы для метода SEM-EDS оцениваются как диагностические, а не как хорошие, поскольку метод EDS обладает хорошей чувствительностью только к определенным легким и тяжелым элементам. Самые быстрые анализаторы SXRF - это каротажные устройства, в которых ширина луча значительно увеличена для определения содержания элементов с большим временем выдержки при увеличении объема поверхностного отбора проб. Метод SXRF не может определить содержание минералов. Кроме того, SXRF-анализаторы нечувствительны к легким элементам, таким как литий, а пределы обнаружения и накладывающиеся сигналы в значительной степени зависят от времени выдержки. При постоянном времени выдержки в 1 мс (самом низком из всех) анализ LIBS мгновенно становится чувствительным ко всем элементам, вплоть до низких ppm (w/w), даже к сере, как было доказано ранее, и ко всем минералогиям, подтвержденным методом SEM-EDS.

4. Выводы

Лоток, содержащий 3,8 метра керна, был проанализирован с помощью LIBS core scanner, ECORE, с использованием метода контроля/валидации.

1. Керносканер LIBS сообщает о содержании минералов, многоэлементном анализе, плотности и твердости пород в зависимости от глубины бурения.

2. Возможности каротажа керна анализатором LIBS базируются на основе его большей площади выборки (репрезентативности) с шагом 10 см и на основе его скорости по сравнению с другими методами.

3. Поскольку LIBS - это метод абляции, ширина луча не регулируется, как при использовании других методов IR-HSI или SXRF, но время выдержки у него наименьшее из всех. Кроме того, при фиксированном низком времени выдержки в 1 мс LIBS spectrum подтверждает высокую мгновенную чувствительность ко всем элементам вплоть до низких ppm, чего нет для SXRF и других методов рентгенографии. Время анализа LIBS в значительной степени компенсирует репрезентативность той же площади, поскольку его низкое время ожидания позволяет сканировать большую поверхность за единицу времени.

4. LIBS является надежным картографом минералов и его эффективность была продемонстрирована путем сравнения его селективности и скорости с другими сканерами керна. Сгенерированная карта является первой картой полезных ископаемых с разрешением >7,62 мегапикселя, созданной с использованием полностью автоматизированной процедуры одиночного сканирования прибора LIBS.

5. Прибор LIBS-HSI ECORE универсален: его можно использовать как для минералогической визуализации с высоким разрешением, так и для сканирования керна с низким разрешением. Такая двойственность улучшает результаты ГПП на PGE и другие ПИ.

6. В будущем необходимо разработать стандартную аналитическую процедуру для анализа тысяч метров керна.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ (АНР) ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (*Kumai*) [7].

1. Введение

В последние годы в центральной и южной частях гор Дасинганлин были проведены обширные аэрогеофизические исследования. Они предоставили ценные базовые данные для геологических исследований и поисков полезных ископаемых в регионе. Одна из ключевых проблем заключается в том, как эффективно использовать многочисленные геологические, аэрогеофизические и геохимические данные для прогнозирования полиметаллического и др. оруденения в этой области.

Количественные методы могут быть использованы для создания модели минерализации на основе комплексных геологических, геофизических и геохимических параметров известных месторождений. Аналогии могут быть использованы для количественных расчетов и классификации аномалий. Однако этот подход применим только к хорошо изученным площадям. В случаях, когда данных недостаточно модель не может быть применена. Кроме того, при наличии мультиколлинеарности стандартное отклонение коэффициентов регрессии увеличится, что сделает модель необоснованной. Напротив, качественные методы не так сильно зависят от уровня изученности, как количественные методы, но существует большая неопределенность из-за разного восприятия разными исследователями.

Процесс аналитической иерархии является широко используемым методом для решения задач, связанных с комплексной оценкой множества факторов. Он сочетает качественные и количественные методы для разделения задач прогнозирования минерализации на несколько ключевых влияющих факторов, которые оценивают вероятность минерализации и формируют иерархическую структуру в соответствии с их доминирующими взаимосвязями. Целевые районы поисков могут быть определены путем попарных сравнений. Так была подтверждена эффективность метода аналитической иерархии при прогнозировании минерализации урана в бассейне Тарима, на сурьмяное (золотое) оруденение в районе Пуцин в Гуйчжоу и др.

В этом исследовании построена система индексов оценки на основе объединения данных аэрогеофизической съемки, геологических, геохимических и др. данных. Были рассчитаны относительные веса каждого показателя, чтобы сформировать стандарт оценки для геолого–аэрофизико-геохимической интегрированной модели. Также была построена карта информационной энтропии модели, обеспечивающая основу для выделения поисковых площадей.

2. Метод аналитической иерархии.

Метод аналитической иерархии (АИР) был предложен в начале 1970-х годов. Он позволяет оцифровать комбинацию качественных и количественных параметров и широко применяется в различных областях. В данном исследовании АИР использовался для задач прогнозирования минерализации на основе системы критериев и создания иерархической аналитической модели формирования оруденения. Были проведены сравнения относительной важности для каждого уровня и фактора с соответствующим присвоением числовых значений. Весовые значения каждого уровня и фактора были рассчитаны с использованием математических методов, а целевые участки были спрогнозированы на основе выявления аномалий минерализации. Процесс моделирования с использованием АИР можно разделить на следующие четыре этапа:

Создание модели АИР.

При использовании АИР для анализа проблем принятия решений первый шаг включает организацию, иерархизацию и построение модели иерархической структуры. В соответствии с этой моделью сложные задачи разлагаются на несколько уровней и постепенно анализируются на уровнях, которые намного проще исходного для решения сложных задач. Количество уровней в этой иерархической структуре зависит от сложности задачи и уровня детализации, необходимого для анализа. Как правило, количество уровней не ограничено. Однако рекомендуется, чтобы каждый элемент на каждом уровне доминировал не более чем над семью другими элементами, чтобы избежать трудностей при попарном сравнении и вынесении суждений, вызванных большим количеством элементов. Надежная иерархическая структура чрезвычайно важна для решения задач. Она должна основываться на всестороннем понимании проблемы лицом, принимающим решения. Взаимосвязи между элементами должны быть прояснены, чтобы обеспечить установление разумной иерархической структуры.

Построение матриц оценок.

Оценка уровня А с использованием матрицы суждений включает сравнение относительной важности факторов B1, B2, ... и Bn на следующем уровне В. Это сравнение обычно выражается в следующей форме (табл. 1).

Общая форма матрицы оценок.

A	B1	B2	...	Bn
B1	B1/B1	B1/B2	...	B1/Bn
B2	B2/B1	B2/B2	...	B2/Bn
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Bn	Bn/B1	Bn/B2	...	Bn/Bn

Табл. 1.

Для количественной оценки матрицы суждений предложено использовать числа от одного до девяти и их обратные величины в качестве шкалы. В таблице 2 приведены значения, связанные со значениями шкалы от одного до девяти.

Табл. 2.

Значение шкалы матрицы суждений.

Масштаб	Значение
1	Сравниваются два элемента; оба элемента имеют одинаковое значение.
3	Сравниваются два элемента; первое немного важнее.
5	Сравниваются два элемента; первое значительно важнее.
7	Сравниваются два элемента; первое очень важно.
9	Сравниваются два элемента; первое чрезвычайно важно.
2, 4, 6, 8	Представьте медианные значения соседних суждений, упомянутых выше.

Весовые коэффициенты одноуровневого ранжирования и проверка согласованности.

На основе полученной матрицы оценок вес может быть рассчитан путем определения максимального собственного значения и собственного вектора. Затем вектор максимального веса нормализуется и выводится. Из-за сложности объективных вопросов и разнообразия человеческого познания в заключении проводится проверка на согласованность, чтобы убедиться, что суждения соответствуют здравому смыслу. Этапы проверки согласованности следующие:

1. Рассчитайте индекс согласованности C_I

$$C_I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Где λ_{max} является максимальным собственным значением матрицы оценок и n порядок матрицы суждений.

2. Найдите соответствующий средний индекс согласованности R_I

Средний индекс случайной согласованности R_I приводится средний индекс согласованности, полученный путем вычисления 1000 образцов с матрицей положительных обратных значений в диапазоне от одного до девяти, как показано в таблице 3.

Табл. 3.

Средний индекс случайной согласованности.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

3. Рассчитайте коэффициент согласованности C_R .

$$C_R = \frac{C_I}{R_I}$$

На основе формул (1) и (2) значение C_l может быть рассчитан. Когда C_l меньше 0,10, согласованность матрицы оценок считается приемлемой. В противном случае в матрицу оценок следует внести соответствующие корректировки.

Расчет весов общего ранжирования иерархии.

Если верхний уровень А содержит m факторов, а именно A_1, A_2, \dots, A_m с соответствующими общими весами иерархического ранжирования a_1, a_2, \dots, a_m , а нижний уровень В содержит n факторов, а именно B_1, B_2, \dots, B_n и их одноуровневых весовых коэффициентов ранжирования для факторов A_j обозначаем как $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj}$ (если B_k не связано с A_j , $b_{kj} = 0$), тогда общие веса ранжирования иерархии уровня В могут быть получены в соответствии с информацией, представленной в таблице 4.

Табл. 4.

Таблица расчета веса иерархии при сортировке.

B \ A	A	A_1	A_2	...	A_m	Total Hierarchy Ranking Weights of Level B
		a_1	a_2	...	a_m	
B_1		b_{11}	b_{12}	...	b_{1m}	$\sum_{j=1}^m b_{1j}a_j$
B_2		b_{21}	b_{22}	...	b_{2m}	$\sum_{j=1}^m b_{2j}a_j$
\vdots		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
B_n		b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nm}	$\sum_{j=1}^m b_{nj}a_j$

Относительный вес важности уровня С по отношению к общей цели также может быть получен с использованием матричного масштаба и метода расчета, упомянутых ранее.

3. Построение и вес системы оценочных индексов.

3.1. Построение системы оценочных индексов.

Целью оценки является вынесение ценных суждений относительно оцениваемого объекта. Следовательно, создание системы оценочных индексов для оптимального выбора целевых районов поисков должно обеспечивать конкретную и оперативную систему оценочных индексов. Для создания этой системы индексов необходимо определить общую цель, установить целевой уровень, разложить общую цель на первичную систему индексов, вторичную систему индексов и так далее. В конечном итоге это формирует таблицу общей системы оценок.

В соответствии с геологической целью данного исследования, полиметаллические руды (медь, свинец, цинк и серебро) являются объектами прогнозирования. Путем изучения характеристик, полученных из геологических, аэрогеофизических (магнитных,

радиометрических, электромагнитных) и геохимических данных, концептуальная модель иерархического анализа прогнозирования и оценки аэрогеофизических аномалий показана на рисунке 1. Модель состоит из двух уровней. Первый - уровень (A), представляющий цель модели по определению целевых минерализованных участков. Второй - это уровень критериев (B, C), который включает три основных уровня: геологическую, аэрогеофизическую и геохимическую комплексную оценку (B) и восемь конкретных оценочных показателей подуровней (C).

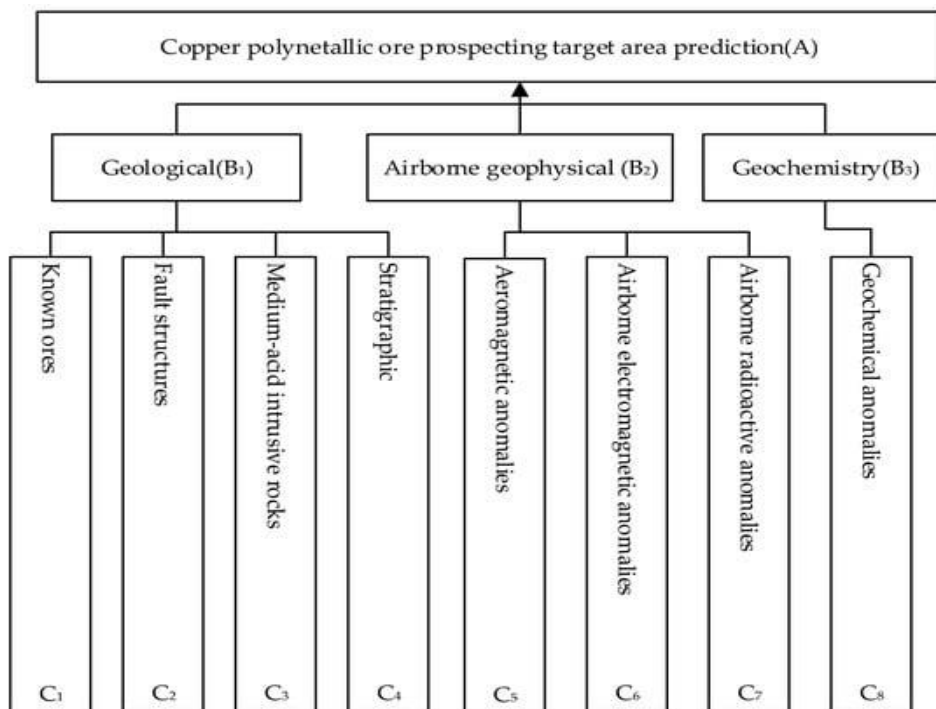


Рис. 1. Концептуальная модель иерархического анализа для прогнозирования полиметаллических руд.

1. Геологические признаки (B₁)

Известные руды (C₁): обобщение информации об известных месторождениях и точках минерализации является основным признаком для прогнозирования минерализованного целевого участка.

Структуры разломов (C₂): согласно региональным геологическим данным, разлом и структурные признаки в районе включают пересечения двух или более разломов и одиночных разломов.

Среднекислые интрузивные породы (C₃): среднекислые интрузивные породы широко распространены в районе и тесно связаны с эндогенной минерализацией. Большинство месторождений полезных ископаемых в этом районе сосредоточено в пермских и юрских интрузивных породах, которые служат рудовмещающими в этом районе. Зона контакта между

массивами горных пород и окружающими породами считается благоприятным местом для минерализации.

Стратиграфический (С₄): статистическое распределение известных руд показывает, что благоприятными стратиграфическими слоями для медно-полиметаллических руд являются верхняя юра и нижняя пермь.

2. *Аэрогеофизические признаки (В₂)*

Аэромагнитные аномалии (С₅): аномалии, которые тесно связаны с известной минерализацией, аномалии, предположительно связанные с минерализацией, аномалии с неясными свойствами и аномалии, которые, как предполагается, имеют низкую разведочную значимость на основе существующих данных.

Аэро-электромагнитные аномалии (С₆): аномалии, предположительно являющиеся зонами минерализованных изменений или зонами минерализованных разломов; аномалии, предположительно являющиеся зонами разломных нарушений; аномалии, предположительно относящиеся к породам с низким удельным сопротивлением; или аномалии с неясными свойствами.

Аэро-радиометрические аномалии (С₇): два типа аномалий, а именно аномалии калия и аномалии урана и тория.

3. *Геохимические аномалии (В₂)*

Согласно собранным почвенным геохимическим данным в масштабе 1:200 000, основными рудообразующими элементами, относящимися к медно-полиметаллическим рудам, являются Ag, Cu, Au и Zn. Характеристики содержания аномальных элементов, масштаб и зональность концентрации являются важными признаками для поисков (С₈).

3.2. *Определение весов оценочных индексов.*

В соответствии с принципом АНР были построены две матрицы попарного сравнения для первичных и вторичных показателей системы индексов оценки для оптимального выбора целевых районов поисков. Окончательная матрица дискриминации была получена путем численного преобразования, и были рассчитаны ее максимальное собственное значение и вектора веса. Затем была выполнена проверка согласованности, чтобы окончательно определить вес каждого показателя и составить таблицу модели оценки информационной энтропии на основе значений веса, как показано в таблицах 5 и 6.

Начальное взвешенное значение каждого оценочного показателя.

Evaluation Contents	Initial Weights	Evaluation Indicators	Initial Weights
Geological	0.5	Known ores	0.20
		Stratigraphic	0.10
		Medium-acid intrusive rocks	0.10
		Fault structures	0.10
Airborne geophysical	0.3	Aeromagnetic local anomalies	0.14
		Airborne electromagnetic local anomalies	0.08
		Airborne radiometric local anomalies	0.08
Geochemical	0.2	Geochemical anomalies	0.20

Табл. 6.

Модели комплексной информационной оценки геолого-аэрогеофизической и геохимической информации.

Indicators	Assignment Signs	Values	
Known ores (20 points)	Large, medium, and small-sized ore deposits	Within 1 km of known ore deposits.	20
	Mineralization points	Within 0.5 km of known mineralization points.	15
Geological (50 points)	Alteration of surrounding rocks.		10
	Stratigraphic (10 points)	Ore-bearing stratigraphic layer. ($P_1d^2, P_1t, P_1, P_1b, P_1z_s, P_1ds, P_2l, P_1g, P_2s, P_1w, P_1sh, P_1x$)	10
		Ore-bearing stratigraphic layer. ($O_2h, O_1w, D_1, D_2t, C_2b, C_3h^4, D_3a, T_1^1, T_1^2, T_1h, S_3$)	8
		Ore-bearing stratigraphic layer. (J_2f, J_2h, J_3mn)	6
Other stratigraphic layers.		4	

3.3. Метод взвешивания для моделей прогнозирования.

Используя вышеупомянутую комплексную информационную поисковую модель АНР с размером сетки 2км×2 км, вся территория разделена на несколько ячеек сетки одинакового размера. Информационные значения каждого поискового показателя в пределах каждой единицы сетки суммируются.

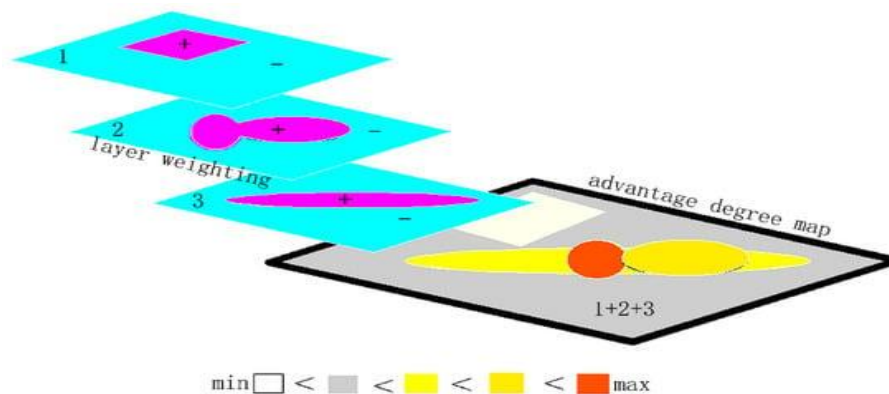


Рис. 2. Схема алгоритма получения информации о метках в металлогенической перспективной зоне.

Полученное комплексное информационное значение используется для построения контура карты, как показано на рисунке 2. Наконец, минимальный порог для района поиска определяется путем сравнения информационных значений известных минерализованных участков.

4. Применение.

Центрально-южная часть Великого хребта Синьань характеризуется сильным наложением, сочетанием и трансформацией тектоно-магматической области палеозоя в палеоазиатском океане и тектоно-магматической области кайнозоя Биньсянь-Западная часть Тихого океана. Область демонстрирует типичные черты аккреционных орогенных поясов. Эндогенное оруденение в этой области в основном включает железо, медь, никель, золото, серебро, олово, свинцово-цинковые, медно-цинковые, медно-свинцовые, свинцово-цинково-серебряные, железо-полиметаллические и медно-полиметаллические месторождения. Известные месторождения в районе могут быть классифицированы на четыре типа: гидротермальный, скарновый, порфировый и щелочные редкоземельные месторождения в гранитах.

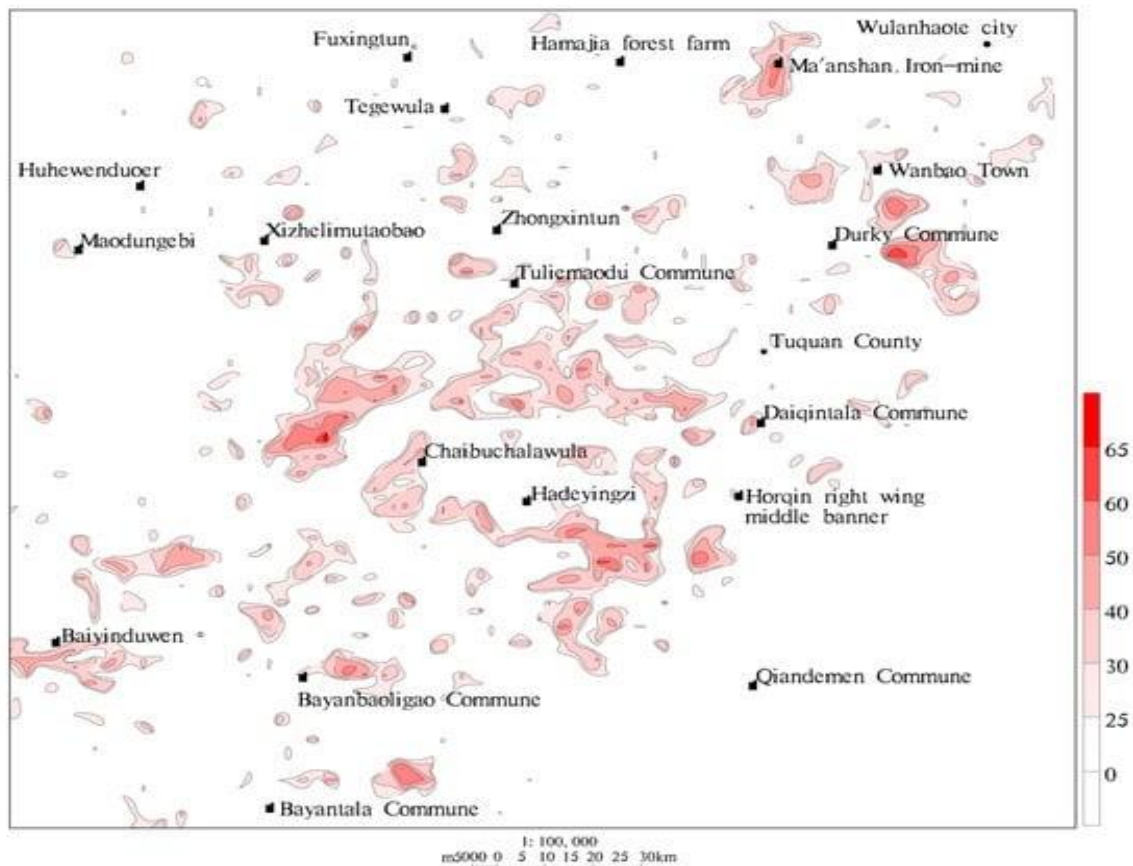


Рис. 3. Карта изолиний с прогнозной информацией.

С использованием вышеупомянутого АНР была сгенерирована карта информационной ценности, как показано на рисунке 3. Сравнивая информационные значения известных минерализованных участков, можно определить нижний предел комплексной информационной ценности для целевого района поиска, равный 35.

В качестве примера рассматривается оптимизация целевого участка поисков нескольких металлов в районе Наониушань. Он расположен на юго-востоке автономного района Внутренняя Монголия. Геологически он связан с зоной поднятия Йема. В районе развиты разломы, в основном в северо-восточного и северо-западного простираний, аналогичные структурам на известном месторождении меди Ляньхуашань (месторождение с преобладанием меди и сопутствующими ей свинцом, цинком и серебром), как показано на рисунке 4.

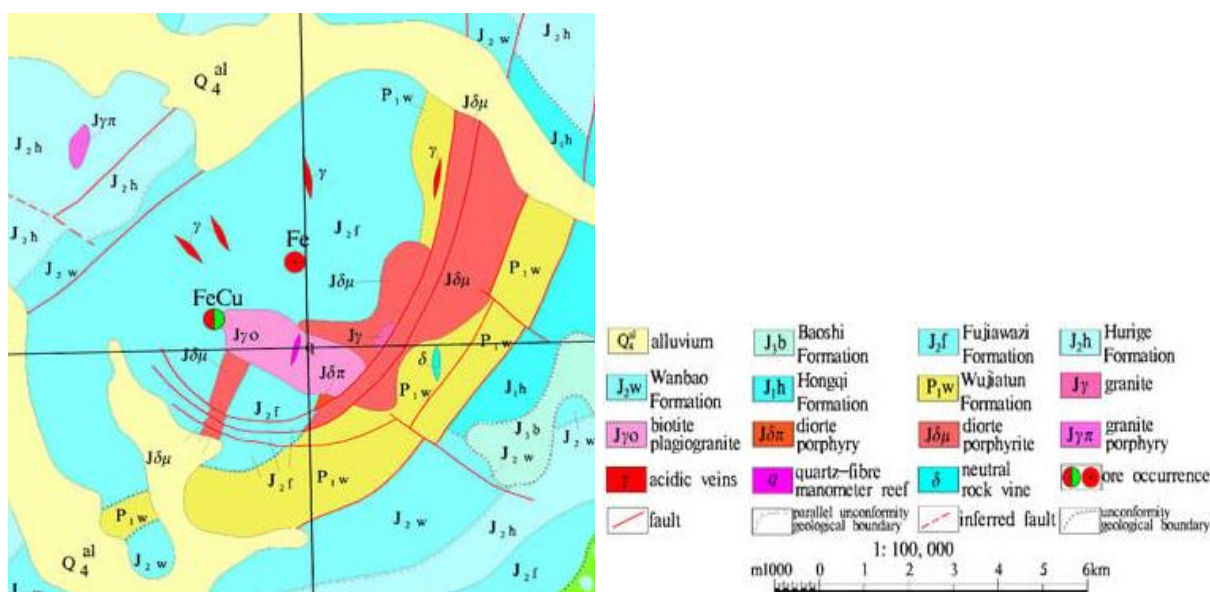


Рис. 4. Геологическая карта района Наониушань.

В дополнение к рыхлым четвертичным отложениям, основные стратиграфические единицы в районе включают: нижнепермская формация Вуцзятунь (P_1w) осадочно-обломочная порода, интеркалированная линзами известняка; среднеюрская формация Фуцзьяжэзи (J_2f) риолит, крупнозернистый андезит и туф; формация Ванбао (J_2w) конгломерат и песчаник, интеркалированные угольными пластами; и формация Хурихе (J_2h) туф, туфовидный конгломерат и интеркалированные линзы аргиллитов. Обнаженные интрузивные породы в основном состоят из диорит-порфирита ($J_2\mu$), сиеногранита (J_2o), биотит-сиеногранит-порфира ($J_2\pi$), жильного диорита (δ), гранита (γ), кварцевых жил (q) и др. В районе были выявлены два месторождения железа и меди, среди которых геологическая среда железно-медного месторождения чрезвычайно схожа с геологической средой медного месторождения Ляньхуашань, и оба являются гидротермально-порфировыми месторождениями, залегающими в вулканических структурах.

Региональная аэромагнитная аномалия характеризуется наложением двух ориентированных с севера на северо-восток зон средней интенсивности на ровном и слабом отрицательном магнитном поле. Между ними были обнаружены два месторождения железа и меди. Было отмечено, что зона аэромагнитных аномалий средней интенсивности на юго-восточной стороне соответствует диорит-порфиру и граниту. Аэромагнитная аномалия С-74-215 расположена в пределах юрского конгломерата и четвертичных осадков. Максимальная интенсивность достигает 1400 нТл, как показано на рисунке 5.

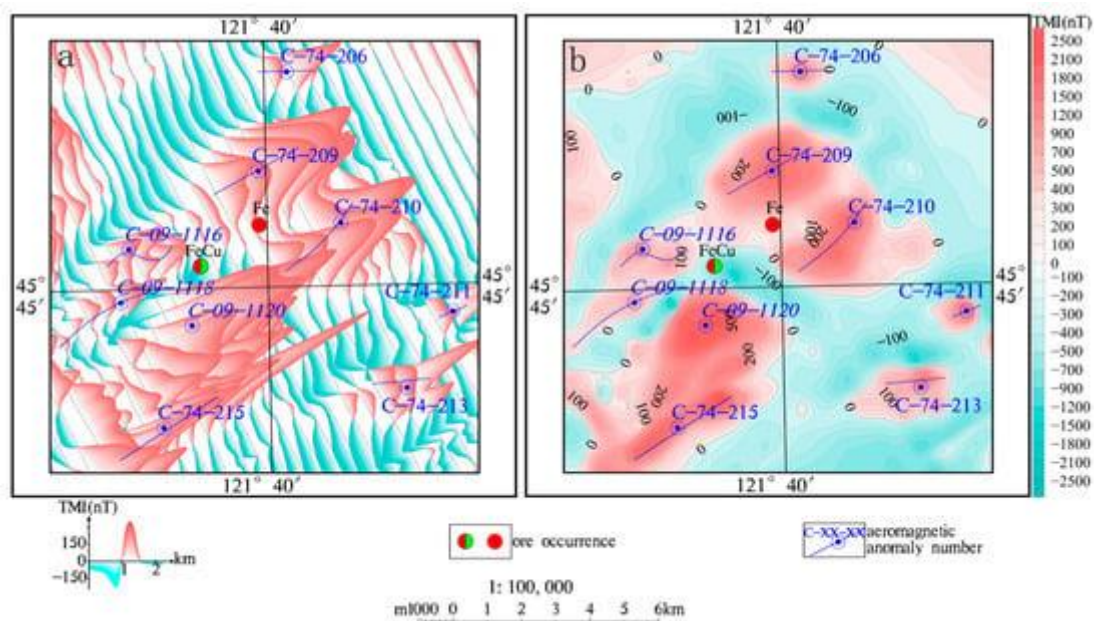


Рис. 5. Карты общей магнитной напряженности (ТМІ) района Наоюшань.

Предполагается, что аномалия вызвана скрытой интрузией и изменениями вмещающих пород. Четыре локальные магнитные аномалии средней интенсивности распределены вдоль главного вулканического жерла и указывают на наличие диорит-порфира.

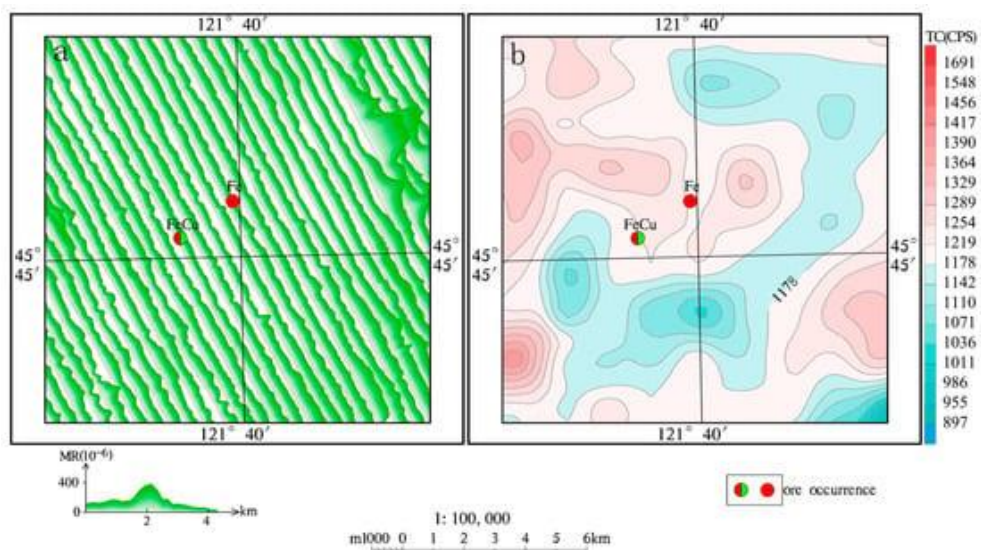


Рис. 6. Аэро-электромагнитная и радиометрическая карта района Наоюшань.

Контурная карта общего канала бортовой гамма-спектрометрии показывает, что отражательная способность горных пород в этом районе относительно низкая, обычно она проявляется как зона с низкими значениями. Четвертичный и пермский периоды соответствуют относительно низким уровням содержания радиоактивных элементов. Напротив, юрские интрузивные породы соответствуют относительно их высоким уровням. Аномалии аэро-гамма-спектрометрии показаны на рисунке 6.

Большинство районов региона имеют комплексные геохимические аномалии таких элементов, как Cu, Pb, Au и As. В частности, вблизи известных месторождений также имеются геохимические аномалии таких элементов, как Cu, Pb, Au, Ag и As, причем элемент Cu представляет собой зону геохимических аномалий высокого значения.

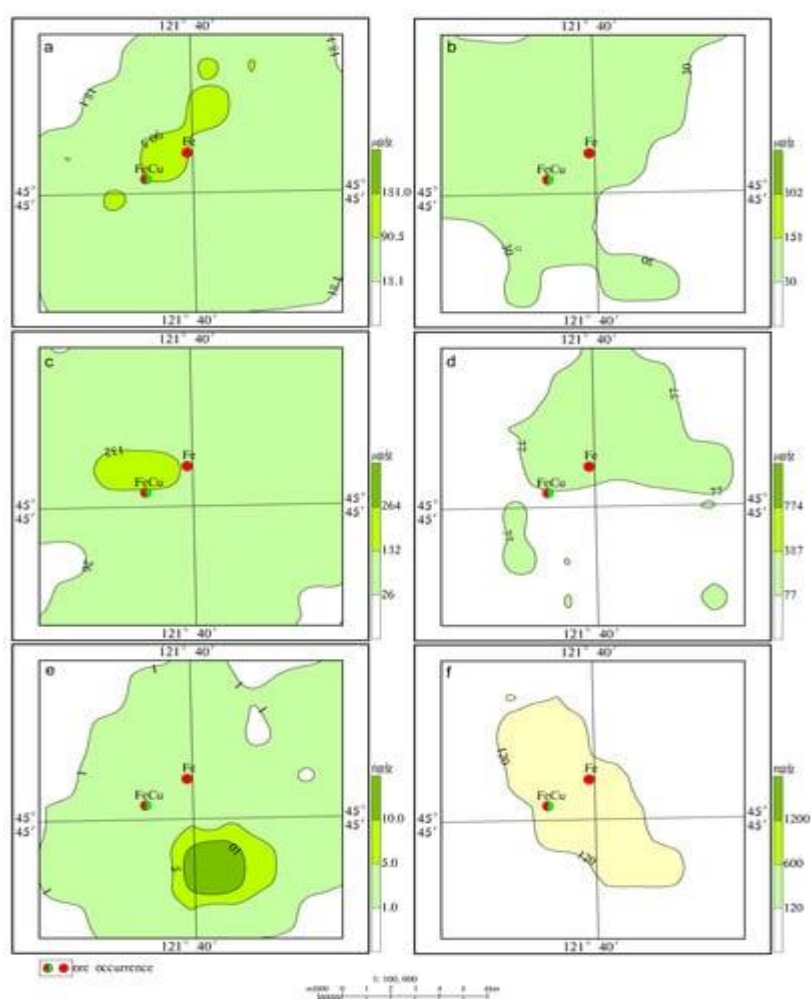


Рис. 7. Карта геохимических аномалий в р-не Наонъюшань. (а)Cu; (b)Pb; (c)As; (d)Zn; (e)Au; (f)Ag. (единица измерения над цветовой шкалой - мкг/г, что соответствует 10^{-2}).

При анализе карты геохимических аномалий становится очевидным, что известные рудные месторождения вблизи них демонстрируют типичную картину минерализации медных и полиметаллических руд с геохимическими аномалиями фронтальных элементов: большая площадь геохимических аномалий фронтальных элементов с относительно высокими

концентрациями As, Au, Ag и др. и аномалии от низких до средних значений рудообразующих элементов, таких как Cu, Pb и Zn. Кроме того, в зоне аномалий с высоким содержанием Au в южной части целевого района также имеются низкокачественные геохимические аномалии таких элементов, как Cu, Ag и Mo. Эти обширные аномальные зоны служат важнейшими территориями поисков медно-полиметаллических месторождений и действуют как прямые индикаторы (рис. 7).

Для вычисления суперпозиции информационной ценности каждого поискового показателя составлена карта информационной ценности (рис. 8). Ценность информации колеблется от 25 до 50, и в соответствии с минимальным значением 35, определенным как пороговое значение ценности информации для поискового признака первого уровня по всему региону средней и южной частей гор Дасинганлин. Эта конкретная область может быть определена как целевая поисковая площадь.

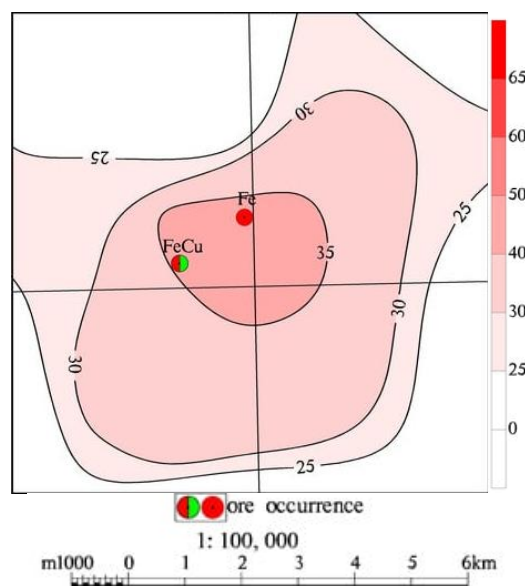


Рис. 8. Информационная карта целевого участка поисков медно-полиметаллических руд.
(значения изолиний представляют собой безразмерные данные).

5. Выводы.

1. Успешно построена система оценки целевых участков минерализации, основанная на принципах АНР. Были рассчитаны веса каждого критерия и сформулирована комплексная модель оценки ценности геолого-аэрогеофизико-геохимической информации. Были разработаны различные методы взвешивания ценности информации в соответствии с характеристиками аэрогеофизических съемок. Результатом является интуитивно понятная прогнозная карта, на основе оптимизации целевых зон минерализации и проведения объективных и всесторонних оценок. В тоже время метод АНР имеет ограничения, связанные с полнотой данных и их возможной интерпретацией.

2. Представлен пример применения системы оценки, построенной с использованием АНР для выбора поисковых площадей в центрально-южном сегменте региона Дасинганлин, в районе Наонюшань. Была сгенерирована карта информационного наполнения исследуемой территории (рис. 3). На основе значений информационного содержания в пределах района, было определено нижнее пороговое значение 35 для выделения перспективных площадей. Последующая полевая заверка подтвердила эффективность этого подхода. В общей сложности в этой области было определено 19 перспективных участков для поисков медно-полиметаллических и др. рудных месторождений. Основные прогнозируемые типы оруденения включают гидротермальные, порфировые, эпитермальные и скарновые месторождения.

3. Метод АНР наиболее эффективно может быть использован при региональных прогнозно-минерагенических исследованиях и в проектах рекогносцировки, на основе аэрогеофизических и др. площадных данных. Однако при проведении исследований, районного масштаба и крупнее, с использованием конкретных методов и технологий необходимо отдельно разрабатывать иерархические прогнозно-геологические модели, чтобы они соответствовали требованиям проекта, учитывая фактические обстоятельства.

4. В последние годы интенсивно развиваются прогнозно-поисковые технологии, в т.ч. анализ «больших данных» на основе искусственного интеллекта. Эти достижения подталкивают к переходу от традиционных качественных и комбинированных качественно-количественных геологических исследований к количественным, предоставляя возможности прогнозирования с использованием «больших данных».

V. ПОИСКИ МЕДНЫХ РУДНЫХ ЖИЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОГРАММЕТРИИ С БПЛА (*район Шахзаде–Аббас, Иран*) [5].



1. Введение.

В последние годы технологии дистанционного зондирования при поисках месторождений полезных ископаемых значительно продвинулись. Данные дистанционного зондирования, (ДДЗ) такие как Landsat ETM + / OLI, Sentinel, SPOT и IRS, могут быть использованы для геологического и структурного картирования в различных масштабах. В настоящее время точные геологические карты могут быть составлены благодаря изображениям высокого разрешения, получаемым с помощью аэрофотосъемки и развития технологий обработки изображений. Однако применение авиационных и спутниковых снимков высокого разрешения в основном ограничено из-за высокой стоимости и недоступности данных. Сегодня фотограмметрия с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) постепенно заменяет традиционное наземное и обычное авиационное картографирование, особенно в труднодоступных районах.

Фотограмметрия с БПЛА открыла новую перспективу в аэрофотосъемке в поисковых целях. В кайнозойском Керманском магматическом поясе (КСМВ) в Иране выявлено несколько меднорудных объектов, таких как Сар Чешме, Мейдук, Даррехзар и др. Они принадлежат к порфировому и жильному типам. Месторождения порфировой меди можно обнаружить с помощью ДДЗ благодаря сопровождающих их ореолам гидротермальных изменений. Жильная медная минерализация контролируется разломами и трещинными зонами, которые могут не сопровождаться мощными зонами изменений. Тем не менее они могут быть выявлены с

помощью ДДЗ при составлении крупномасштабных геолого-структурных карт с использованием БПЛА.

Целью данного исследования является проведение крупномасштабного геолого-структурного картирования с использованием фотограмметрии с БПЛА при поисковых работах на месторождении меди Шахзаде Аббас. Месторождение Шахзаде Аббас расположено в 28 км к востоку от крупного медно-порфирового района Сар Чешме, провинции Керман, Иран. Жильное медное оруденение встречается в разломах и трещинах. Рельеф исследуемой территории горный, что затрудняет полевые исследования и геологическую съемку. В рамках этого исследования подготовлены несколько продуктов фотограмметрии для дополнения данных полевых работ и определения минерализованных зон.

2. Геологические условия.

Район Шахзаде–Аббас расположен в южной части третичного магматического пояса Урумие-Дохтар, в центре КМВ. Месторождения меди в КСМВ Ирана генетически связаны с миоценовыми порфирами (рис. 1а). Порфиры были внедрены в вулкано–осадочные толщи эоцена с образованием связанных с ними медных руд. Вулкано–осадочные породы эоцена включают базальты, андезиты, трахиандезиты, трахибазальты, риолиты, агломераты, туфы, потоки лавы и осадочные породы. Миоценовыми интрузивными породами являются гранит, гранодиорит, диорит и монцонит. Самыми старыми и молодыми обнаженными породами являются вулканические породы верхнего-нижнего эоцена и четвертичные аллювиальные отложения и гравийные веера соответственно. В этом районе расположены некоторые известные месторождения меди (рис. 1b). Исследуемый район расположен в эоценовом вулканогенно–осадочном комплексе, состоящем в основном из вулканокластике и осадочных пород (рис. 1с).

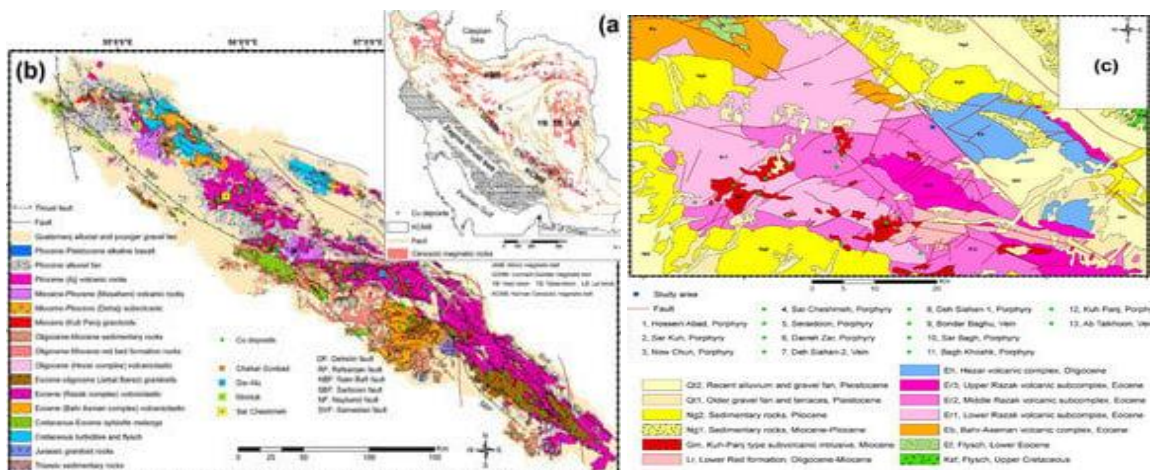


Рис. 1. (а) Карта кайнозойских вулканических поясов, (b) упрощенная геологическая карта КСМВ и (с) геологическая карта исследуемого района.

3. Материалы и методы.

В случае минерализации жильного типа снимки с БПЛА могут предоставлять изображения высокого разрешения, подходящие для получения геологической и структурной информации в соответствии с целями поисков. В этом исследовании предпринята попытка продемонстрировать возможности БПЛА по созданию базовых геологических карт для поисков месторождений Cu жильного типа. Для достижения цели были рассмотрены пять основных частей, включая (1) настройку параметров полета и управления, (2) получение и обработку изображений, (3) создание проекта прогнозной геолого-структурной карты, (4) полевые заверочные работы и (5) доработку прогнозной карты.

3.1. Тип платформы и параметры полета.

В этом исследовании использовался DJI Phantom 4 Pro версии V2.0 (Da-Jiang Innovations Science & Technology Co., Ltd., Шэньчжэнь, Китай) с оригинальными датчиками (рис. 2а).

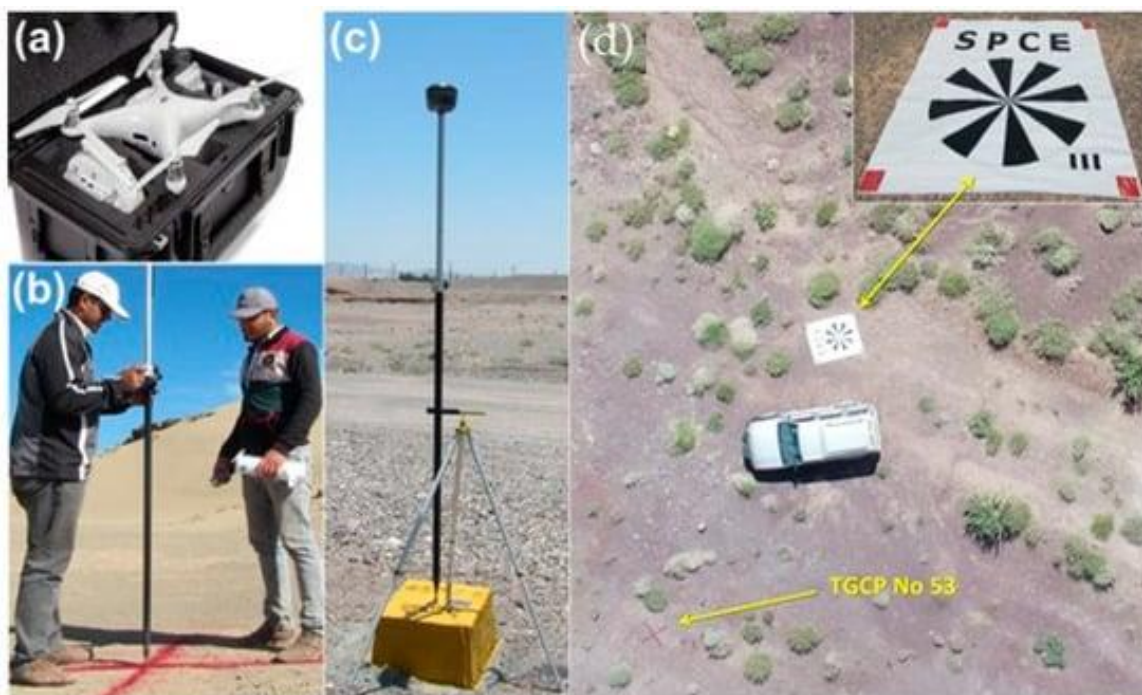


Рис. 2. (а) DJI Phantom 4 Pro версии V2.0, (b) TGCP (маркер), (c) приемник SOUTH Galaxy G1+ на эталоне и (d) мишень Siemens star target.

Этот легкий квадрокоптер позволяет получать снимки с высоким разрешением и приемлемым временем полета, покрывая большую площадь по сравнению с обычными более тяжелыми платформами hexacopter и octocopter. Он оснащен встроенной 1-дюймовой 20-мегапиксельной CMOS-камерой (Da-Jiang Innovations Science & Technology Co., Ltd., Шэньчжэнь, Китай) на карданном подвесе. Объектив камеры обеспечивает поле зрения (FOV) 84° при диапазоне фокусных расстояний 8,8 мм/24 мм (эквивалент формата 35 мм) и диафрагме f/2,8–f/11 с автофокусировкой.

Траектория полета была разработана в программном обеспечении DJIGo (v4.0, Da-Jiang Innovations Science & Technology Co., Ltd., Шэньчжэнь, Китай). Для получения точности менее 5 см было применено минимум 70% перекрытий боковых и 80% фронтальных изображений. Полет выполнялся на высоте 70 м (скорость полета 72 км/ч), чтобы обеспечить пространственное разрешение менее 10 см. Другие настройки полета выполнялись с помощью приложения DroneDeploy (версия 66, Infatics Inc., Санта-Клара, Калифорния, США).

3.2. Сбор и анализ данных.

Встроенный GPS в DJI Phantom 4 Pro версии 2.0 помогает привязывать полученные изображения к географическим меткам для общих приложений. Однако для повышения точности геометрических поправок необходима сетка временных наземных контрольных точек (TGCPs) или маркеров. Для геологического картирования требовалась точность менее 5 см. Соответственно, было рассмотрено 220 TGCPs для определения требований к точности. TGCPs были отмечены в виде красных цветных крестиков на поверхности земли (рис. 2b). Их точное местоположение было установлено с помощью наземной кинематико-дифференциальной системы глобального позиционирования в реальном времени (RTK-DGPS) с помощью приемника SOUTH Galaxy (G1+, South group, Гуанчжоу, Китай) (рис. 2c). Кроме того, были рассмотрены пять контрольных точек с известными координатами для оценки общей точности ортомозаического изображения всей территории. Для оценки пространственного разрешения БПЛА обычно используются несколько типов калибровочных мишеней, а именно bar target, Slanted Edge Test и Siemens star. Siemens star позволяет измерять пространственное разрешение во всех направлениях траектории полета БПЛА. Мишень Siemens star на плоской поверхности использовалась для определения пространственного разрешения CMOS-камеры (рис. 2d).

Количество полученных изображений зависит от размера участка и перекрытия изображений. После аэрофотосъемки для фотограмметрической обработки было применено программное обеспечение Agisoft PhotoScan (версия v1.4.4, ООО "Агисофт", Санкт-Петербург, Россия). Необходимые данные, включая отдельные изображения и местоположения камер, были загружены с беспилотника в программное обеспечение для инициализации процедуры фотограмметрии. В качестве исходной была выбрана Всемирная геодезическая система 1984 года (WGS84). Местоположения камер и точки сопоставления использовались для выравнивания изображений и создания модели облака разреженных точек. Модель включает набор выровненных дискретных изображений и должна быть преобразована в модель облака плотных точек с географической привязкой.

Доступно несколько методов для решения задачи привязки, таких как прямая привязка с использованием необработанных данных бортовой GNSS (GNSSNAV), прямая привязка с

использованием постобработанных кинематических данных GNSS с одночастотной фазой, несущей без наземной поддержки на месте, прямая привязка с использованием постобработанных кинематических данных GNSS с двухчастотной фазой несущей на месте с наземной поддержкой и косвенная привязка с использованием наземных контрольных точек (GCPs). Хотя применение косвенной географической привязки с использованием GCP требует длительных интенсивных полевых работ, оно предлагает наиболее точное решение. После построения модели разреженного облака точек задача географической привязки была выполнена с использованием 220 TGCPs. В результате на следующем этапе была построена модель плотного облака точек. Модель плотного облака точек представляет собой единое отображение всех полученных изображений, которые связаны между собой на основе расчета информации о глубине для каждого местоположения камеры. Сетчатые модели и цифровые модели рельефа (ЦМР) обычно строятся на основе модели облака плотных точек. Сетчатая модель, представляющая собой отображение поверхности и/или объема объектов, была реконструирована. Для построения ортофотоснимка (ортомозаики) можно использовать как сетчатую, так и DEM-модели.

3.3. Подготовка геолого-структурной карты.

Геологические карты с максимально возможным количеством деталей могут повысить эффективность поисковых программ. Снимки с дронов предоставляют ценную информацию для мгновенного определения литологии перед проведением геологической съемки. Таким образом, проект (первый вариант) геолого-структурной карты может быть подготовлен на основе продуктов фотограмметрии, чтобы сэкономить время и затраты на полевые работы. Если беспилотник оснащен мультиспектральным или гиперспектральным датчиком, в дополнение к литологическому картированию может быть выполнено картирование гидротермально-метасоматических изменений пород, сопровождающих оруденение.

Минералы и их изменения обычно проявляют спектральные особенности в коротковолновой инфракрасной области электромагнитного спектра (SWIR). Видимые полосы не могут предоставить важную информацию для выявления этих характеристик. CMOS-камера DJI Phantom 4 Pro версии 2.0 обеспечивает RGB-изображения, которые не отображаются в виде отдельных синих, зеленых и красных полос. Этот недостаток делает невозможным применение методов обработки изображений, но эти изображения с высоким разрешением могут быть применены для геолого-структурного картирования.

Визуальная интерпретация изображений может выполняться на основе изменения цвета горных пород и может привести к первичной идентификации литологии на исследуемой территории. Таким образом, может быть подготовлен первый вариант геолого-структурной

карты. Точность этой карты зависит от опыта геолога-интерпретатора изображений. Изображения с высоким разрешением также можно использовать для выделения линеаментов из фотограмметрических продуктов. В этом исследовании ортофотоснимок был создан с использованием сетчатой модели. Он был загружен в программное обеспечение ArcGIS (версия 10.7, Институт исследований экологических систем -Esri, Редлендс, Калифорния, США) для создания проекта геолого-структурной карты исследуемого района. Первичные полигоны геологических единиц были созданы на основе визуальной интерпретации ортофотоснимка. Эти полигоны были отредактированы и доработаны после проведения полевых заверочных работ. Поскольку минерализованные жилы контролируются как разломами, так и дайками, съемка геологических структур жизненно важна для разведки минерализации меди жильного типа на месторождении Шахзаде Аббас. Таким образом, модель была создана на основе DEM в программном обеспечении ArcGIS и применялась для выделения особенностей линеаментов.

3.4. Полевая заверка.

Полевые и лабораторные исследования являются неотъемлемой частью заверки полученных ДДЗ. Геологическая съемка была проведена с учетом проекта геолого-структурной карты. Образцы горных пород были взяты в заранее определенных местах для проверки структурной принадлежности, литологии и возможной минерализации. Были проведены минералого-петрологические и др. исследования для определения типов горных пород их состава и изменений. В заключении, данные полевых заверочных исследований были использованы при завершении составления прогнозной геолого-структурной карты исследуемого района.

4. Результаты и обсуждение.

Тип минерализации - ключ к поискам.

Район Шахзаде Аббас расположено на КМВ. Оруденение всего рудного района связано с эоценовым магматизмом. Плутонические породы ответственны за формирование порфирового и/или жильного медного оруденения. Разломы создали благоприятную среду для циркуляции гидротермальных флюидов и способствовали распространению медного оруденения. Таким образом, определение точного местоположения и особенностей линеаментов, таких как выделение и характеристики разломов, их стыков, заполнение дайками и т.п., может помочь в выделении минерализованных зон жильного типа в горном рельефе исследуемой территории.

Поисковое значение параметров полета.

Уменьшение высоты полета важно для повышения пространственного разрешения для точного определения геологических границ и положения разломов. Однако это увеличивает

время аэрофотосъемки и процедуры обработки изображений. Более высокое разрешение изображений БПЛА по сравнению со спутниковыми снимками дает получение более точной структурной информации. Полет выполнялся на высоте 70 м. Пространственное разрешение 3,26 см было рассчитано с использованием мишени Siemens star target. Это пространственное разрешение удовлетворяло требуемой точности для определения литологии и особенно для выявления потенциально минерализованных линеаментов. Линии пролета были спроектированы таким образом, чтобы существовало 70% боковых и 80% фронтальных перекрытий. На рисунке 3а синим цветом показана область с отличным перекрытием изображения. Таким образом, было достигнуто идеальное перекрытие изображений без зазоров на площади 2,02 км². Для построения модели облака плотных точек было получено около 4018 изображений. Географическая привязка модели облака плотных точек была выполнена с использованием 220 TGCP (около одного TGCP на гектар). На рисунке 3б показано распределение TGCPs в исследуемом районе. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) составила 2,91 см для TGCPs. RMSE 3,96 см был получен для пяти контрольных точек, которые удовлетворяли требуемой точности менее 5 см для ортофотоснимка.

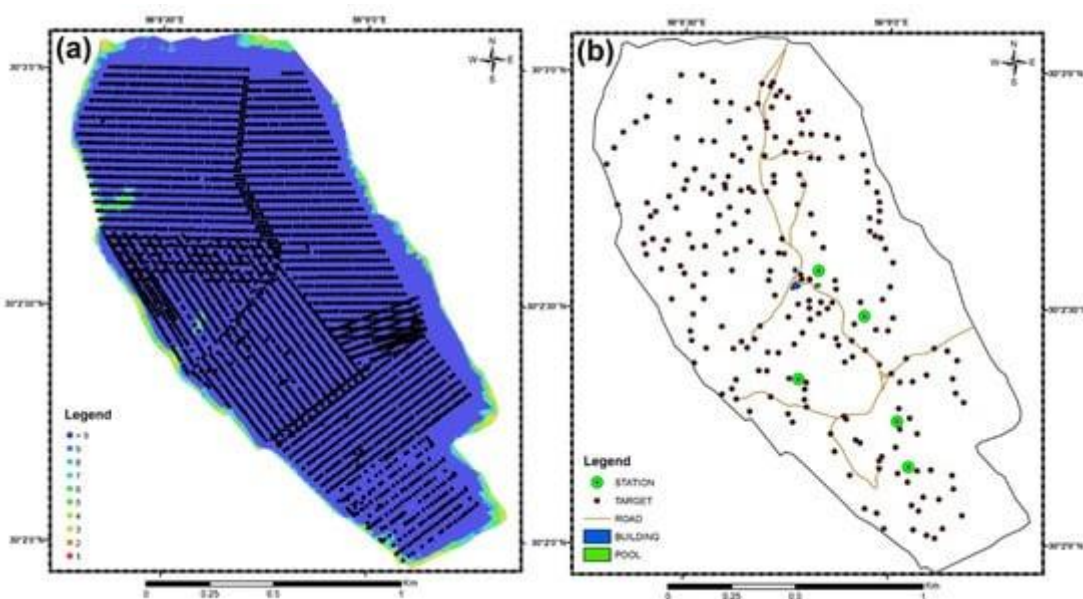


Рис. 3. (а) Расположение камер и наложение изображений и (б) распределение TGCPs.

Анализ ортофотокарты, выделение линеаментов - алгоритм «модель тени холма».

CMOS-камера DJI Phantom 4 Pro V2.0 представляет собой датчик RGB. Камера получает изображения в формате RGB, сопоставимые с композитными изображениями true color (TCCS) Landsat ETM+/OLI или Sentinel. Для геологического картирования используются TCS космических датчиков среднего разрешения, но более высокое разрешение CMOS-камеры помогло более точно выделить геолого-структурные особенности.

Ортофотоснимок, полученный из плотного облака точек, представлен на рисунке 4а. Изображение дает полезную информацию о литологии исследуемого района. Горные породы были определены на основе различий в их цвете. Геологические границы были очерчены благодаря высокому разрешению изображения. Первичные полигоны горных пород были нарисованы с помощью программного обеспечения ArcGIS. Алгоритм «модель тень холма» использовался для выделения линеаментных структур, для обнаружения минерализации жильного типа. Структурный слой проекта геологической карты был подготовлен с использованием программного обеспечения ArcGIS. На рисунке 4б показано расположение линейных структурных элементов в исследуемом районе.

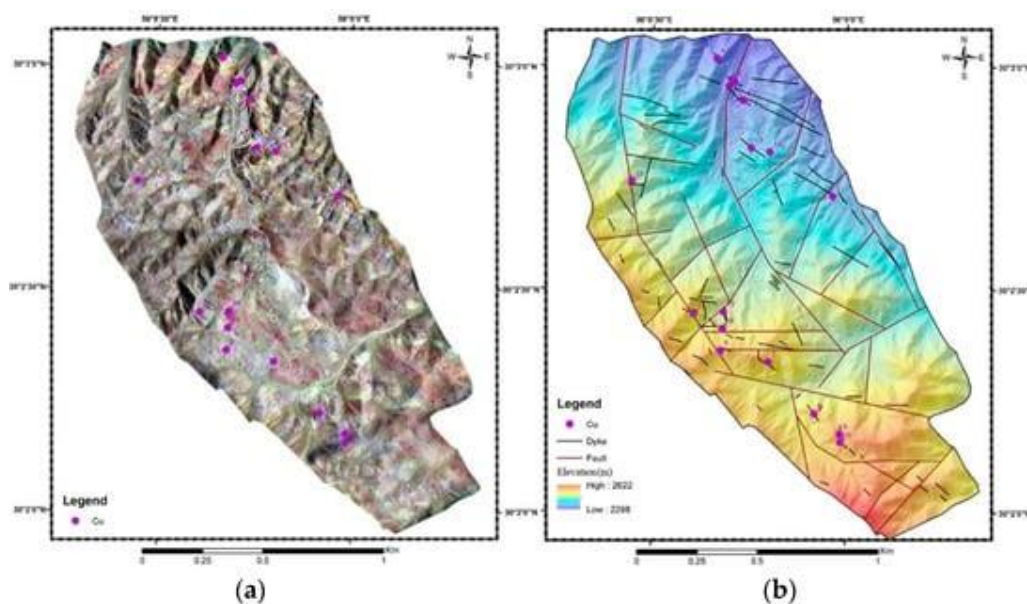


Рис. 4. (а) ортофотоснимок исследуемой территории и (б) линеаменты на основе «модели тень холма».

4.1. Полевая заверка и доработка геолого-структурной карты.

Для завершения составления прогнозной геолого-структурной карты была проведена полевая геологическая заверка. Во время геологической съемки были закартированы различные выходы магматических (андезитов, андезит-порфиров, базальтов и андезит-базальтов) и пирокластических (кристаллических и литических туфов, вулканических лапиллей и агломератов) и осадочных пород, таких как окаменелый известняк, а также дайки различной мощности.

Все породы, как правило, претерпели пропилитовые изменения. (рис. 5а). Поры часто заполнены вторичными минералами, такими как кальцит и кварц. Оливин, пироксен и плагиоклаз видны в тонких срезах (рис. 5b, c).

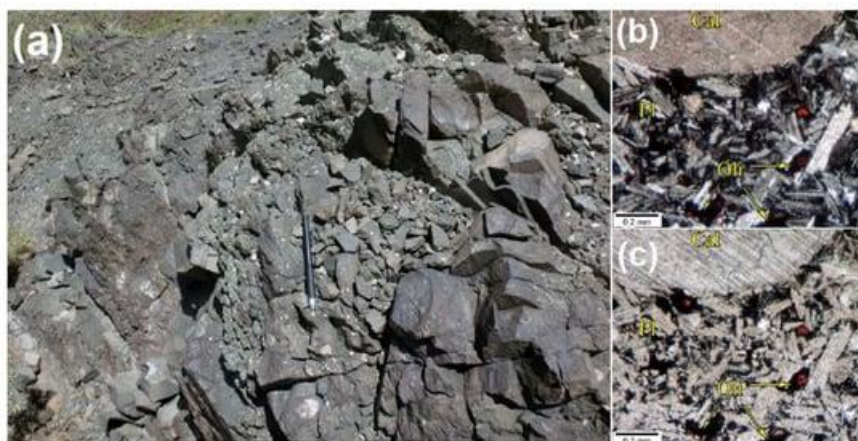


Рис. 5. (a) Обнажение базальта, (b,c) оливин и плагиоклаз внутри вторичного кальцита в режимах XPL и PPL
Cal: кальцит, *Oli*: оливин и *Pl*: плагиоклаз.

Базальтовый андезит имеет порфировую текстуру с очень мелкой, стекловидной основной массой. Выветренная поверхность от коричневого до фиолетового цвета, неизменная порода от серого до темно-серого (рис. 6а). Основными минералами являются пироксен, оливин и плагиоклаз (рис. 6б, в). Породы сильно трещиноваты. Трещины могут быть заполнены жилами кальцита, эпидота, кварца или оксидами железа. Слабая минерализация меди, не имеющая экономического значения, наблюдалась в некоторых жилах вместе с эпидотом (рис. 6а).

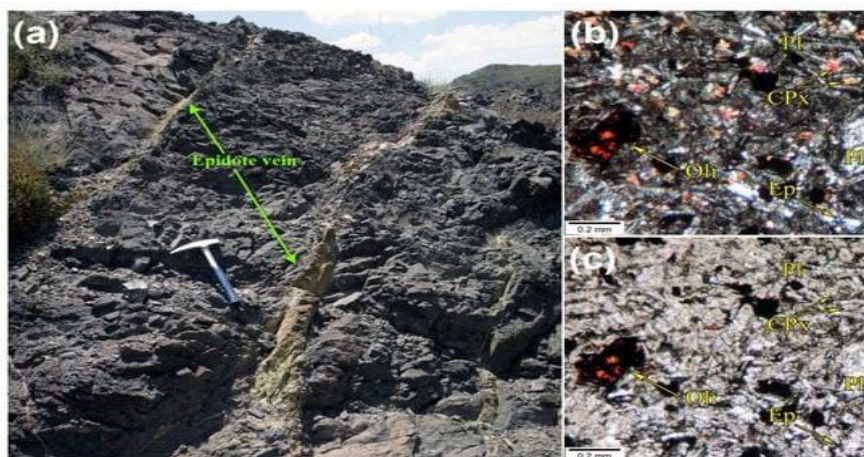


Рис. 6. (a) Обнажение андезито- базальта с прожилками эпидота, (b,c) на тонком срезе - оливин, плагиоклаз, клинопироксен и минералы эпидота в режимах XPL и PPL.
Cal: кальцит, *CPx*: клинопироксен, *Ep*: эпидот, *Oli*: оливин и *Pl*: плагиоклаз.

Андезит - наиболее распространенная магматическая порода, имеет порфировую текстуру и мелкозернистую основную массу (рис. 7а). Выветрелые и свежеразломанные поверхности имеют коричнево-бледно-зеленую и серую окраску соответственно. Основными минералами являются полевой шпат (плагиоклаз) и в меньшей степени пироксен (рис. 7б, с). Дендриты марганца и оксида железа иногда встречаются на поверхности породы. Агломераты в основном состоят из различных типов лав (в основном андезитовых), которые сцементированы вулканическим пеплом (рис. 7е).



Рис. 7. (a) андезит-порфир, (b,c) на тонком срезе - плагиоклаз и хлорит в режимах XPL и PPL соответственно, (d) красный туф и (e) агломерат. *Chl*: хлорит и *Pl*: плагиоклаз.

Вторичные интрузивные фазы в виде даек ответственны за жильную медную минерализацию. Основные простирания даек - северо-западное и юго-восточное, основной состав - порфировые габбро-диориты. На выветренной поверхности они имеют мелкозернистую основную массу и от светло-зеленого до желтого цвета (рис. 8a). Цвет неизменной поверхности - зеленовато-серый. Плагиоклаз, пироксен и оливин - основные минералы (рис. 8б, в). Эти дайки обычно не содержат медной минерализации. Медная минерализация наиболее часто выявляется в дайках диабазов (трахи-базальто-порфирах), (рис. 8d) и обычно сопровождается мелкозернистым плагиоклазом с порфировидными щелочными полевыми шпатами (рис. 8e,f). Диабазовые дайки имеют аналогичное простирание с северо-востока на юго-запад. Мощность диабазовых даек варьируется от 0,5 до 1 м. Минералы меди на поверхности - в виде малахита (рис. 8d). Некоторые жилы эпидота также имеют медную минерализацию.

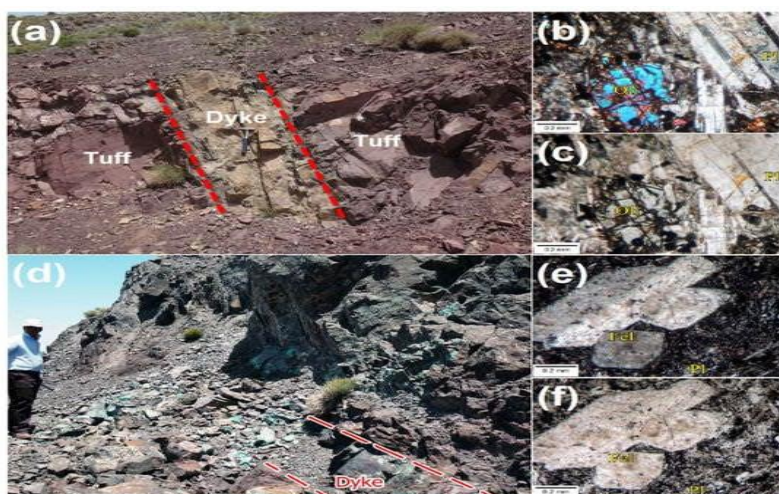


Рис. 8. (a) обнажение дайки микродиоритового габбро, вторгшейся в толщу красного туфа, (b,c) на тонком срезе - плагиоклаз и оливин в режимах XPL и PPL соответственно, (d) обнажение дайки диабазов, содержащей медную минерализацию, (e,f) на тонком срезе - плагиоклаз и оливин в режимах XPL и PPL соответственно. плагиоклаз и полевого шпата в режимах XPL и PPL. *Fel*: полевого шпата, *Oli*: оливин и *Pl*: плагиоклаз.

На рисунке 9 показана результирующая геолого-структурная карта исследуемого района, основанная на аэрофотограмметрии и геологической съемке. Первичные геологические полигоны, которые были нарисованы с использованием ортофотоснимка, были изменены на основе данных полевых работ. Дайки с медной минерализацией отмечены на этой карте для проведения детальной разведки (рис. 9).

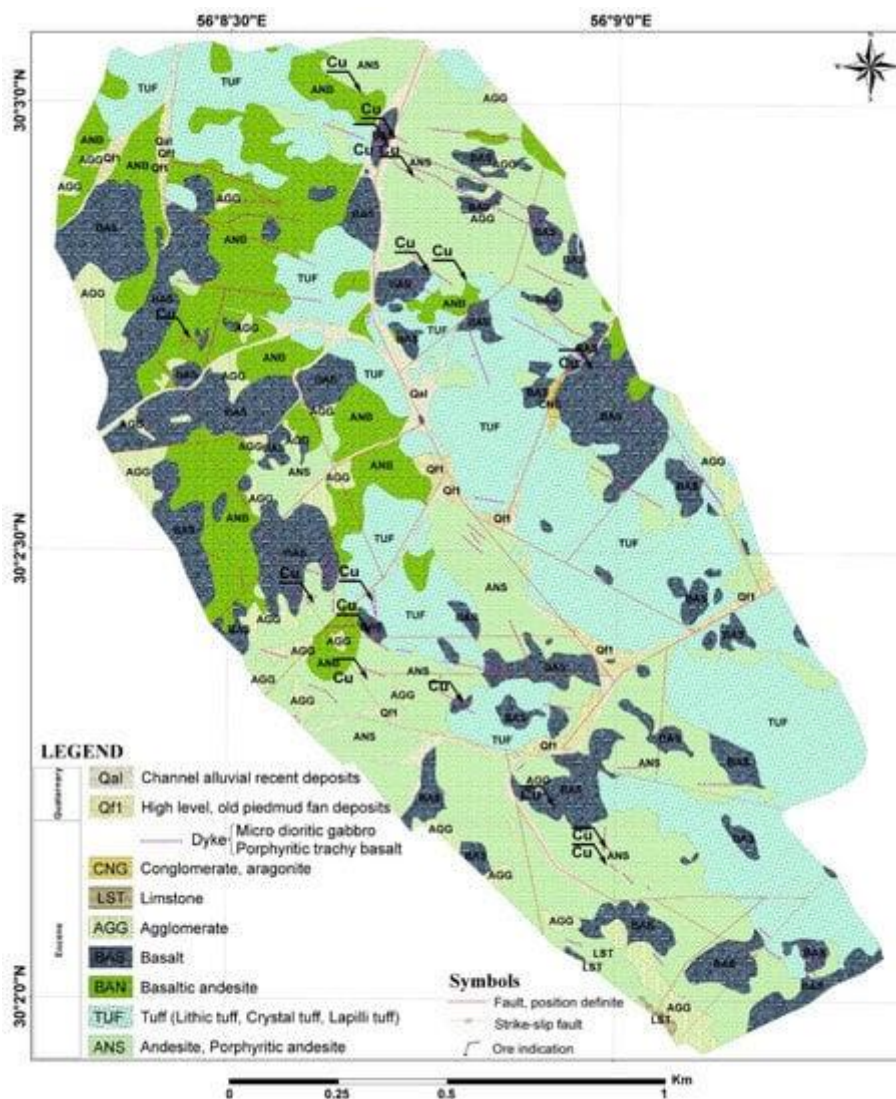


Рис. 9. Геолого-структурная прогнозная карта района Шахзаде Аббас.

5. Выводы

1. ДДЗ с высоким разрешением необходимы для поисков жильных медных месторождений, особенно в отдаленных горных районах. Снимки с БПЛА облегчают картографирование топографии и геологии, особенно в труднодоступной местности.

2. Для использования дронов параметры полета должны определяться в зависимости от целей съемки. Обычно пространственное разрешение и точность фотограмметрических данных

являются двумя основными факторами, которые необходимо контролировать, устанавливая параметры полета. Высота полета и наложение изображений обеспечивают желаемую точность и пространственное разрешение.

3. Составление детальной геолого-структурной карты имеет важное значение для поисков жильного медного оруденения. Оно структурно контролируется разломами и трещинными зонами различной мощности. Для выявления перспективных линейных структур рекомендуется пространственное разрешение около ~5 см. Для соответствия этому разрешению следует рассматривать высоту полета ~70 м. Для достижения этой точности следует учитывать 70% боковых и 80% фронтальных изображений, перекрывающих сеть TGCP.

4. Ортофотоснимки и модели DEM - два основных продукта фотограмметрии с дронов, которые используются для выделения рудоперспективных структур. Ортофотоснимки подходят для выделения геологических единиц. Модели ЦМР должны быть преобразованы в «модель тень холма» для выделения разломов и даек.

5. Рудоперспективные разломы и дайки, должны быть заверены в ходе полевых работ. Минерализация меди жильного типа в районе Шахзаде Аббас часто встречается в дайках диабаз.

6. На следующем этапе программы разведки предлагается сосредоточиться на дайках диабаз, в основном с ориентацией СЗ-ЮВ. Гидротермальные изменения также являются поисковыми признаками оруденения в КМВ. Обнаружение различных типов изменений имеет важное значение, особенно при поисках месторождений порфирового типа. В будущем необходимо добавить датчик с более широким спектральным диапазоном для картирования зон изменений в районах с аналогичными геологическими условиями.

VI. ИЗОТОПЫ СВИНЦА ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ «НЕСОГЛАСИЯ» (район Киггавик, Нунавут, Канада) [2].

1. Введение

Цель этого исследования - оценить дисперсию изотопов Pb в качестве поискового признака месторождений U типа «несогласия». Исследование преследует две цели: первая касается аналитической методологии, связанной с методами разрушения горных пород и выщелачивания, а вторая - применения метода для поисков урана типа «несогласия».

Месторождения U типа «несогласия» богаты U и относительно бедны Pb, поэтому эффект распада U со временем приводит к накоплению значительных количеств радиогенного Pb. Большие количества U приводят к обогащению до ^{206}Pb и ^{207}Pb в результате радиогенного распада по сравнению с обычным свинцовым ^{204}Pb . Как следствие, урановая минерализация обычно содержит очень высокие соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, а минерализация U типа «несогласия» мезопротерозоя, будет демонстрировать низкие соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, из-за исходного соотношения двух исходных изотопов в минерализации ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,720\%/99,274\% = 0,0073$) и более короткий период полураспада ^{235}U по сравнению с ^{238}U (^{235}U : $7,04 \times 10^8$ лет; ^{238}U : $4,468 \times 10^9$ лет), в то время как фоновая порода будет давать нерадиогенные значения соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и высокие значения соотношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Таким образом, существуют большие различия в значениях соотношения между фоновым материалом и целевой минерализацией U. Соотношения Pb-изотопов предоставляют информацию о сроках минерализации и ремобилизации элементов, а также о присутствии и сроках миграции U и Pb. При взаимодействии с более поздними флюидами минерализация U обычно претерпевает значительные изменения после минерализации и переменную потерю Pb. Миграция и рассеивание, а также последующее осаждение или адсорбция радиогенного Pb из U-минерализации во вмещающие породы составляют основу для использования Pb-изотопов при поисках U-месторождений типа «несогласия» в песчаниках.

Применение метода Pb-изотопного поиска в песчаниках было расширено за счет использования метода слабокислотного выщелачивания (WAL) для частичного выщелачивания измельченного горного материала для извлечения адсорбированных ионов. Однако анализы WAL требуют много времени и очень дороги по сравнению с быстрыми и недорогими литогеохимическими анализами с индуктивно связанной плазмой-масс-спектрометром (ICP-MS) после 3- или 4-кислотного полного расщепления (TAD) и/или 2-кислотного частичного расщепления (PAD). На сегодняшний день нет общедоступной информации, которая сравнивала бы данные по изотопам WAL Pb с обширными геохимическими данными ICP-MS по изотопам Pb, особенно данными PAD.

Из-за этого информационного пробела первая цель этого исследования касается аналитической методологии и включает аналитическую программу сравнения и оценки данных по изотопам Рb, полученных в результате различных методов разрушения горных пород и выщелачивания, которые обычно доступны в отрасли при поисках полезных ископаемых.

Вторая цель этого исследования касается применения метода и включает оценку геохимии дисперсии Рb-изотопа pathfinder как вектора минерализации U. В предыдущих работах с использованием изотопов Рb этот метод применялся к залежам песчаника и рассеянным ореолам в песчанике в хорошо изученном бассейне Атабаска. Однако мезопротерозойские залежи Киггавик-U на северо-востоке региона Телон, Канада (рис. 1) залегают в фундаменте. Здесь были изучены залежи Бонг и Энд, находящиеся в архейском парагнейсе. Они находятся в разных литологических условиях: неоархейские кристаллические метаморфические и магматические породы, при этом минерализация демонстрирует сильный структурный контроль.

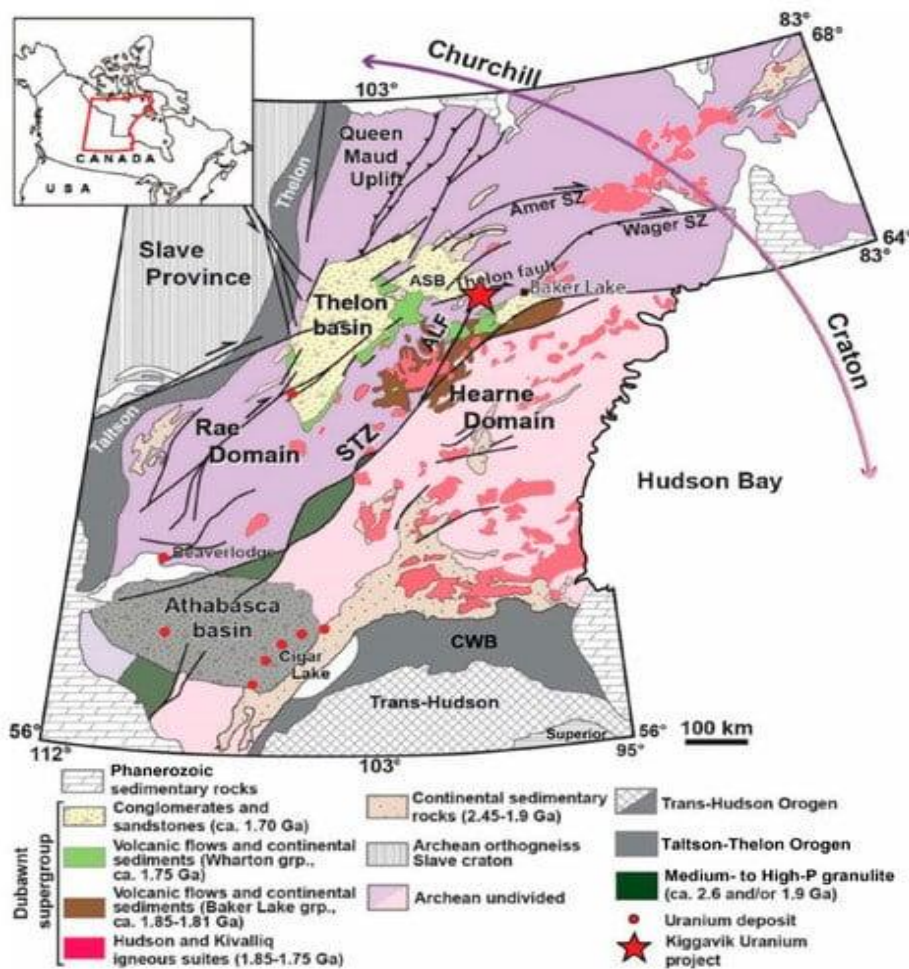


Рис. 1. Геологическая карта провинции Черчилль, показывающая расположение бассейнов Атабаска и Телон, а также проекта Киггавик.

STZ: тектоническая зона Сноуберд; CWB: батолит Чипевиян-Ватаман, ALF: разлом Эндрю-Лейк, ASB: суббассейн Абердин.

2. Геологические условия и урановая минерализация.

В настоящее время территория Киггавик площадью 18 484 га содержит мезопротерозойские месторождения U Бонг, Эндрю Лейк и Киггавик с общими оценочными ресурсами 54 000 т U при среднем содержании 0,32%. Бассейн Телон геологически подобен бассейну Атабаска, в котором вблизи субатабаскского несогласия был обнаружен ряд высококлассных мезопротерозойских месторождений U, залегающих в песчаниках и в фундаменте мирового класса. В районе Киггавик все урановое оруденение находится в литологическом составе фундамента.

Осадочный бассейн Телон в основном представлен ортокварцитовым песчаником и локально присутствующими базальтами формации Куунгми и известняками формации Лукаут-Пойнт. Для диагенетического фторapatита в формации базал Телон был получен возраст около 1667 млн лет, а базальт Куунгми датирован примерно 1540 млн лет.

Кристаллический метаморфический фундамент состоит из архейских гранитно-гнейсовых пород (около 2870 млн. лет и позднеархейских надкорковых пород группы Вудберн-Лейк (2730-2680 млн. лет), а также кислых вулканических и связанных с ними эпикластических пород позднеархейской группы Сноу-Айленд (2620-2580 млн лет) и кремнистых пород палеопротерозойской группы Кетъет (2300-2150 млн лет). Эти породы сильно деформированы, образуют последовательность пологого погружения, которая прерывается Телонским разломом, и демонстрируют раннюю складчатость типа "лежащий" или "оболочечный" с предполагаемым повторяющимся надвигом и перемещением более молодых пород поверх более старых (рис. 2).

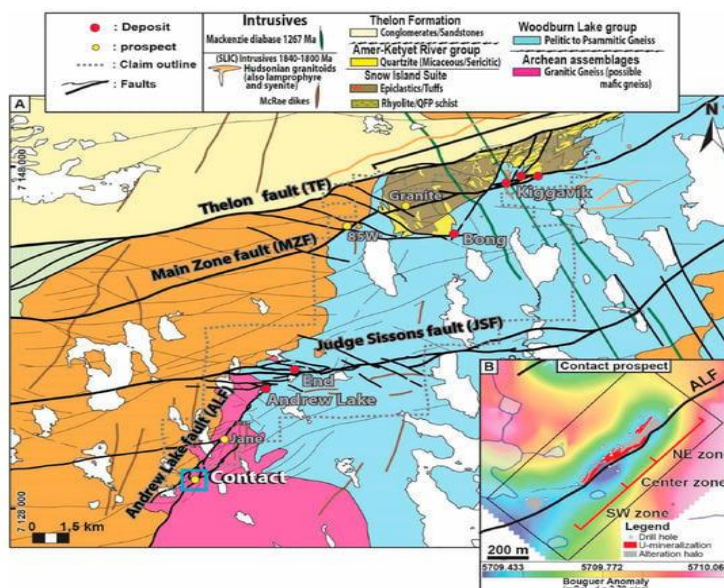


Рис. 2. Геологическая схема района Киггавик.

(А) месторождения U (красные) и перспективы (желтые) (В) $>0,0425\%$ U_3O_8 (красный) и ореол изменения (серый), спроецированный на карту гравитационных аномалий.

Эти породы прорваны позднесиндрогенными гранитами Гудзоновой свиты ок. 1830 млн. лет назад и ультракалийными дайками минетт/бостонит и лампрофир, а также гранитом Киваллик магматической свиты рапакиви ок. 1750 млн. лет назад (гранит Нуэлтин). Все породы бассейна Телон разрезаны диабазовыми дайками Маккензи около 1267 млн лет назад.

Залежи урана образовались при высоких диагенетических температурах, около 200°C, в результате взаимодействия флюидов и вмещающих пород фундамента. Оруденение является результатом попадания окисленных донных рассолов в зоны разломов и трещиноватости с образованием рассеянной и жильной минерализации уранинита в трещинах и в виде матрицы брекчий.

Залежи урана распределены вдоль северо-западного разлома Эндрю-Лейк и северо-восточного разломов Джадж-Сиссонс и Киггавик, которые характеризуются аномалиями понижений силы тяжести и удельного сопротивления, связанных с хрупкостью структуры и изменением глинистых минералов.

В контексте связанного с несогласием металлогенеза U предполагается, что окисленные флюиды извлекли U из гранитов Гудзона и Киваллика, а также кислых вулканических/эпикластических пород свиты Сноу-Айленд вдоль крутопадающих разломов, брекчий и систем трещин в виде тонких прожилок в окислительно-восстановительных ловушках, содержащих сульфиды. Основными урансодержащими минералами являются уранинит и коффинит. Сульфидные минералы (пирит, халькопирит, ковеллит и галенит) локально связаны с минерализацией и были отнесены к стадиям до-, син- и постминерализации. Множественные фазы минерализации и/или ремобилизации урана были выведены из U-Pb возрастов уранинита, которые варьируются от ок. 1500 млн лет до ок. 500 млн лет.

Подобно месторождениям U в бассейне Атабаски, минерализация Kiggavik U связана с изменением глинистых минералов-вмещающих пород, включающих иллит ± sudoит ± гематит ± сульфаты фосфатов алюминия (APS), а также кварцевые прожилки. Минерализация урана и связанные с ней изменения сосредоточены в разломах, и обычно окружены зоной гематизации, простирающейся на десятки метров.

3. Материалы и методы.

В этом исследовании были использованы 2815 образцов из 75 скважин, которые пересекали метагрейвакскую ассоциацию Pipedream и/или эпикластический материал свиты Сноу-Айленд и/или архейские ортогнейсы, для сравнения результатов, полученных с помощью широко используемых методов отбора проб (TAD, PAD и двух разновидностей WAL), и для оценки их использования в геохимии Pb-isotope pathfinder.

Из 2815 образцов, проанализированных в этом исследовании, 2208 были использованы для сравнения результатов по изотопу TAD Pb с результатами PAD. Пробы были взяты в различных районах проекта Киггавик, но в основном из района месторождения Энд-У (823 пробы из 23 скважин), района месторождения Бонг-У (802 пробы из 14 скважин), района месторождения Эндрю-Лейк-У (181 проба из 5 скважин) и района разведки Слик-Лейк (149 проб из 3 скважин). Остальные 607 проб были взяты из перспективных зон U (22 скважины) и использовались для сравнения результатов PAD и результатов двух WAL.

Перед геохимическим анализом образцы были измельчены до 1/4 дюйма (-6 мм) с помощью щековой дробилки, а затем дополнительно измельчены до -2 мм. Для оценки расщепления/выщелачивания каждый образец был разделен на две части. Одна часть, предназначенная для кислотного расщепления, затем была измельчена до -0,106 мм. Другая часть, предназначенная для испытаний WAL, была измельчена до -1,40 мм с помощью керамической щековой дробилки, а затем измельченный материал был разделен на две фракции размером 0,50–1,40 мм и 0,35–0,50 мм, при этом выщелачивание проводилось с размером фракции 0,35–0,50 мм.

Две пробы измельченной каменной массы подвергались кислотному выщелачиванию, а дробленая порода подвергалась двум слабокислотным выщелачиваниям:

- TAD: 3-кислотное тотальное расщепление каменной массы с использованием смеси сверхчистой концентрированной плавиковой (HCl), азотной (HNO₃) и соляной (HF) кислот, при этом пульпа расщепляется до сухости в системе термоблочных труб для расщепления с последующим растворением остатка в деионизированной воде перед анализом. Анализы изотопов Pb проводились с использованием прибора Perkin Elmer Elan DRC II ICP-MS (корпорация Perkin Elmer, Уолтем, Массачусетс, США), который был откалиброван с использованием сертифицированных материалов.
- PAD: SRC-GA 2-кислотное обратное (царская водка) частичное сбраживание (выщелачивание) каменной массы с использованием HCl + HNO₃ (объемное соотношение 1:3) на бане с горячей водой с последующим разбавлением деионизированной водой. Анализы изотопов Pb также проводились с использованием прибора Perkin Elmer Elan DRC II ICP-MS.
- WAL-S: SRC-GA для слабокислотного выщелачивания с использованием 5% азотной кислоты. В общей сложности 0,5 г образца и 5 мл HNO₃ были загружены в полиуретановую пробирку, которую поместили в ультразвуковую ванну на 2 часа, а затем центрифугировали. Один грамм жидкости разбавляли 50 г кислотного реагента и измеряли соотношения изотопов Pb с использованием прибора Perkin Elmer ICP-MS высокого разрешения.

- WAL-Q: слабокислотное выщелачивание с использованием 2% азотной кислоты. В общей сложности 0,5 г образца и 5 мл HNO_3 были загружены в полиуретановую пробирку, которую поместили в ультразвуковую ванну на 2 часа, а затем центрифугировали. Один грамм жидкости разбавляли 50 г кислотного реагента и измеряли соотношения изотопов Pb с использованием ICP-MS высокого разрешения Thermo Scientific Element II.

Минимальные пределы обнаружения для всех анализов на содержание изотопов Pb составляли 0,001 промилле. Pb-изотопным соотношением (^{206}Pb и $\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $\text{Pb}^{208}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) были рассчитаны непосредственно из Pb-изотопным концентрации (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb), полученных от ICP-MS анализа.

Полученные данные о концентрации изотопа Pb были статистически проанализированы для определения типов распределения совокупности с использованием квантильного анализа, получения одномерной статистики на основе типа распределения, выполнения линейной регрессии для количественной оценки взаимосвязей между совокупностями и выполнения парного t-критерия средних значений Стьюдента из двух выборок, чтобы определить, получены ли наблюдаемые результаты из распределений с равными средними значениями совокупности. Эти исследования были проведены с использованием Microsoft Excel (Microsoft Office 2013, версия 15.0.5223.1001, 2020) и SYSTAT (версия 13.0, SPSS Inc., Чикаго, Иллинойс, США, 2005).

"Избыток Pb" в контексте соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ означает количество ^{206}Pb , которое нельзя объяснить радиогенным распадом количества исходного U, распавшегося до нынешнего содержания U в образце породы, т. е. количество радиогенного Pb, которое не подтверждается количеством U в настоящее время в образце. Для образцов, содержащих отношение $^{238}\text{U}*/^{206}\text{Pb}$ менее 2,459 (при этом $^{238}\text{U}*$ является показателем ^{238}U и равно U-частичному $\times 0,99275$; значение 0,99275 представляет содержание ^{238}U относительно суммы всех изотопов U), рассчитанное отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ $R_2 = 15 + (R_1 \times 15) \times (\text{EXP}(1,55125 \times 10^{-10} \times t) - 1)$ где $R_1 = 1/((1/R_0) - 1 \times (\text{EXP}(1,55125 \times 10^{-10} \times t) - 1))$, $R_0 =$ отношение $^{238}\text{U}*/^{206}\text{Pb}$ и $t =$ прошедшее время в годах (здесь 2200 млн лет). Если проанализированное отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ превышает R_2 , то считается, что присутствует "избыток Pb".

4. Результаты.

Были сопоставлены и оценены результаты анализа по изотопам Pb нескольких широко используемых методов отбора проб и выщелачивания для использования в геохимии поиска Pb-изотопов при поисках урана. Затем была изучена полезность геохимии Pb-isotope pathfinder при поисках уранового оруденения в фундаменте, связанного с несогласиями (т. е. Pb-изотопов как вектора минерализации), с использованием анализа соотношения Pb-изотопов с

использованием данных PAD и WAL-S из архейских месторождений Бонг и Энд У в парагнейсах и архейского месторождения Contact U в ортогнейсах.

4.1. Сравнение процессов усвоения породы и выщелачивания.

Аналитическая программа, разработанная специально для геохимии pathfinder с изотопом Pb, использует ту или иную форму WAL. Была выполнена аналитическая программа, разработанная для сравнения результатов по изотопу Pb в результате различных процессов усвоения породы и выщелачивания. Одномерные статистические данные, обобщающие результаты анализа, представлены в таблице 1.

Табл. 1.

Однофакторная статистическая информация о данных по изотопу Pb.

Сокращения: “-t” и “-p” относятся к TAD и PAD соответственно.

Statistic	²⁰⁴ Pb-t	²⁰⁶ Pb-t	²⁰⁷ Pb-t	²⁰⁸ Pb-t	²⁰⁴ Pb-p	²⁰⁶ Pb-p	²⁰⁷ Pb-p	²⁰⁸ Pb-p
Geometric Mean	0.122	4.434	2.185	4.972	0.040	1.661	0.762	1.751
Median	0.105	3.000	1.815	4.220	0.032	1.080	0.590	1.410
Mode	0.064	2.020	1.010	2.600	0.014	1.200	1.040	1.140
Minimum	0.004	0.347	0.026	0.114	0.002	0.097	0.046	0.154
Maximum	12	1890	282	464	11.2	1870	270	456
Count	2208	2208	2208	2208	2207	2207	2207	2207
Confidence Level on mean (95.0%)	0.0051	0.2417	0.0913	0.1913	0.0021	0.1065	0.0401	0.0834
Statistic	²⁰⁴ Pb-WAL-S	²⁰⁶ Pb-WAL-S	²⁰⁷ Pb-WAL-S	²⁰⁸ Pb-WAL-S	²⁰⁴ Pb-WAL-Q	²⁰⁶ Pb-WAL-Q	²⁰⁷ Pb-WAL-Q	²⁰⁸ Pb-WAL-Q
Geometric Mean	0.010	0.335	0.162	0.452	0.009	0.306	0.147	0.408
Median	0.009	0.308	0.153	0.436	0.009	0.272	0.134	0.378
Mode	0.004	0.140	0.062	0.182	0.004	0.209	0.063	1.100
Minimum	0.001	0.022	0.010	0.024	0.001	0.008	0.004	0.014
Maximum	0.344	111	11.5	17	0.322	126	12.6	15.5
Count	607	607	607	607	607	607	607	607
Confidence Level on mean (95.0%)	0.0009	0.0309	0.0139	0.0387	0.0008	0.0293	0.0129	0.0355

TAD против PAD.

Результаты по содержанию изотопов Pb при 3-кислотном TAD каменной массы были сравнены с результатами, полученными при 2-кислотном тампонажном выщелачивании каменной массы. На графиках квантиль-квантиль данные TAD и PAD показывают распределения, близкие к логарифмически нормальным (рис. 3F и 4F). TAD приводит к высвобождению заметно больших количеств всех изотопов, чем PAD (рис. 3A–C). Средние геометрические значения для данных TAD по сравнению с данными PAD составляют 0,122 промилле по сравнению с 0,040 промилле, 4,434 промилле по сравнению с 1,661 промилле и 2,185 промилле по сравнению с 0,762 промилле для ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb и ²⁰⁷Pb соответственно (табл. 1). Результаты TAD аналогичны результатам PAD при высоких уровнях содержания ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb и ²⁰⁷Pb (например, >~ 40 ppm для ²⁰⁷Pb), но значения TAD намного выше значений PAD при более низких уровнях (например, <~ 25 ppm для ²⁰⁷Pb), демонстрируя гораздо худшую корреляцию (рису. 3C). Из парного t-критерия средних значений Стьюдента для двух выборок (рис. 3F)

показано, что средние значения для данных TAD и PAD существенно различаются, как на уровне значимости 98% (показано ^{207}Pb), так и на уровне 95%, при этом t-критическое значение намного меньше t-статистического значения. В целом, значения данных по ^{204}Pb TAD и PAD коррелируют слабее, чем значения для ^{206}Pb и ^{207}Pb , с коэффициентами корреляции (r^2) 0,8972 против 0,9796 и 0,9148 соответственно, что указывает на больший разброс данных в результатах по ^{204}Pb .

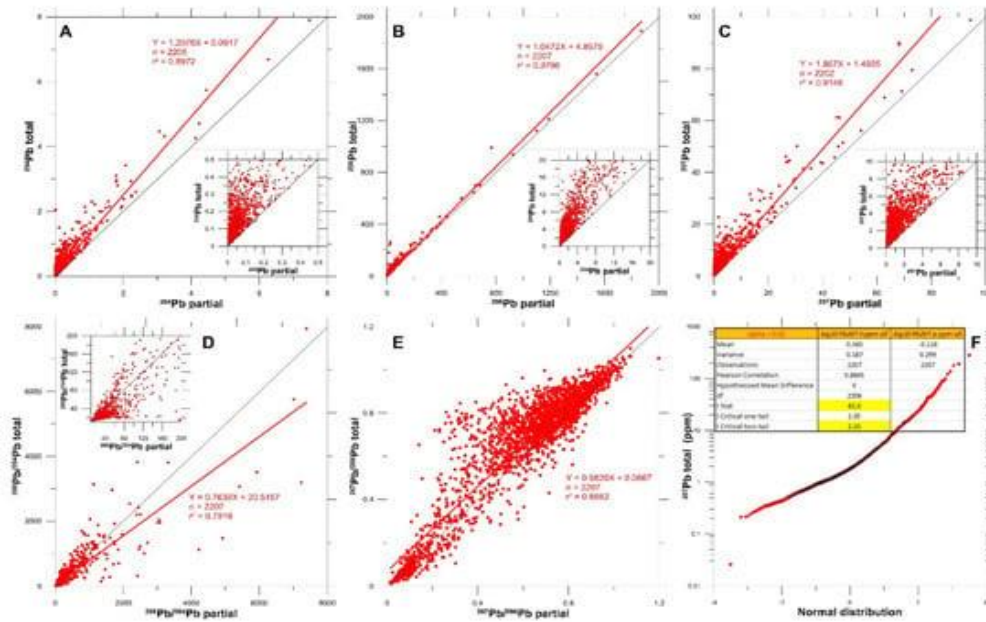


Рис. 3. Диаграммы распределения результатов анализа полного расщепления (TAD) по сравнению с результатами анализа частичного расщепления (PAD) для ^{204}Pb (A), ^{206}Pb (B), ^{207}Pb (C), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (D) и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (E). (F) График квантилей-квантилей данных TAD по ^{207}Pb с результатами t-теста Стьюдента средних значений для ^{207}Pb .

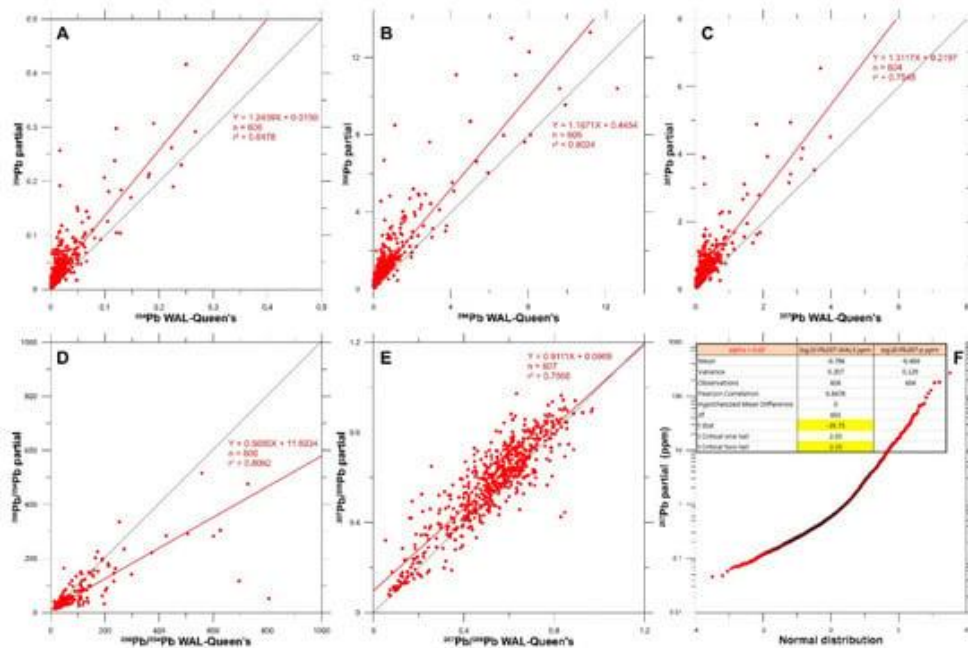


Рис. 4. Диаграммы рассеяния результатов анализа PAD по сравнению с результатами анализа WAL-Q для ^{204}Pb (A), ^{206}Pb (B), ^{207}Pb (C), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (D) и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (E). (F) График квантилей-квантилей данных PAD по ^{207}Pb с результатами t-теста Стьюдента средних значений для ^{207}Pb .

PAD против WAL.

Результаты по содержанию изотопов Pb при частичном сбраживании (выщелачивании) каменной массы с использованием 2-кислотной царской водки в обратном режиме (PAD) были сравнены с результатами, полученными при QFIR WAL (WAL-Q) измельченного материала. На графиках квантиль–квантиль данные PAD показывают распределение, близкое к логарифмически нормальному (рис. 4F), в то время как оба набора данных WAL распределены логарифмически нормально (рис. 5F). Анализы WAL-Q обеспечивают меньшее извлечение Pb, чем анализы PAD (рис. 4A–C). Средние геометрические значения для данных PAD по сравнению с данными WAL-Q составляют 0,040 ppm по сравнению с 0,009 ppm, 1,661 ppm по сравнению с 0,306 ppm и 0,762 ppm по сравнению с 0,147 ppm для ^{204}Pb , ^{206}Pb и ^{207}Pb соответственно (табл. 1). Эти значения ближе друг к другу, чем эквивалентное сравнение TAD и PAD. Из парного t-критерия средних значений Стьюдента для двух выборок (рис. 4F) показано, что средние значения для данных PAD и WAL-Q значительно различаются как на уровне значимости 98% (показано ^{207}Pb), так и на уровне 95%, при этом t-критическое значение намного меньше абсолютного значения t-статистической величины. Значения данных по $^{204}\text{PAD Pb}$ и WAL-Q также более слабо коррелируют, чем значения для ^{206}Pb и ^{207}Pb , с коэффициентами корреляции (r^2) 0,6178 по сравнению с 0,8024 и 0,7548 соответственно, что указывает на больший разброс данных в результатах по ^{204}Pb .

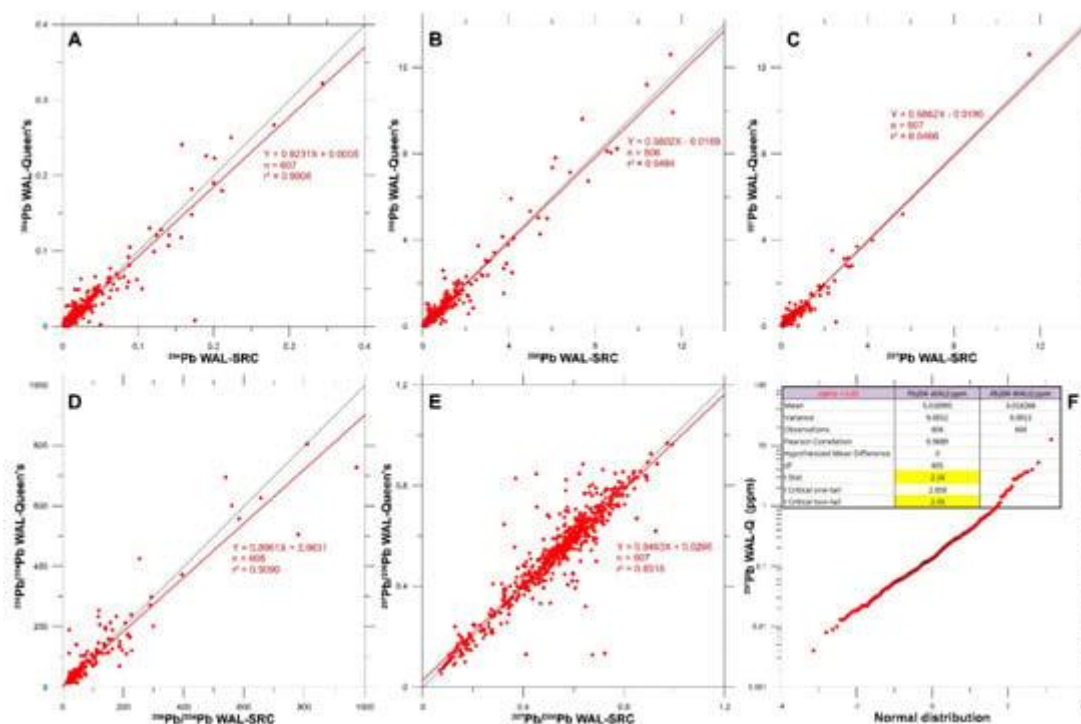


Рис. 5. Диаграммы рассеяния результатов анализа WAL-S по сравнению с результатами анализа WAL-Q для ^{204}Pb (A), ^{206}Pb (B), ^{207}Pb (C), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (D) и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (E). (F) График квантилей-квантилей данных WAL-Q по ^{207}Pb с результатами t-теста Стьюдента средних значений для ^{204}Pb .

Сравнение вариантов WAL.

Результаты по изотопам Pb, полученные с помощью SRC WAL (WAL-S), были сравнены с результатами, полученными с помощью QFIR WAL (WAL-Q), оба были выполнены на измельченном материале. На графиках квантиль-квантиль оба набора данных показывают логарифмически нормальные распределения (рис. 5F). Как показано в таблице 1, анализы WAL-S и WAL-Q обеспечивают очень схожие объемы извлечения изотопа Pb (рис. 5A-C), оба обеспечивают меньшее извлечение Pb, чем PAD, при этом средние геометрические значения для данных WAL-S по сравнению с данными WAL-Q составляют 0,010 ppm по сравнению с 0,009 ppm, 0,335 ppm по сравнению с 0,306 ppm и 0,162 ppm по сравнению с 0,147 ppm для ^{204}Pb , ^{206}Pb и ^{207}Pb соответственно. Из парного t-критерия средних значений Стьюдента для двух выборок (рис. 5F) показано, что средние значения для данных WAL-S и WAL-Q существенно не отличаются на уровне значимости 98% (показано ^{204}Pb), при этом t-критическое значение больше, чем значение t-статистики.

В отличие от сравнений TAD с PAD и PAD с WAL-Q, значения данных для ^{204}Pb WAL-S и WAL-Q почти так же хорошо коррелируют, как значения для ^{206}Pb и ^{207}Pb , с коэффициентами корреляции (r^2) 0,9008 против 0,9424 и 0,9466 соответственно. Результаты ^{204}Pb показывают лишь немного больший разброс данных, чем наблюдалось в результатах ^{206}Pb и ^{207}Pb .

Оба соотношения изотопов ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) демонстрируют схожий разброс данных (рис. 5D, E). Однако распределение данных по соотношению $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ сосредоточено в нижней части шкалы (<около 100), в то время как распределение данных по соотношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ более однородно по всей шкале.

4.2. PAD Pathfinder Pb-Isotope и геохимия WAL: месторождения Бонг и Энд-Уран.

Систематические тенденции в соотношениях $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ наблюдаются в данных образцов, взятых из различных мест района Киггавик, с месторождениями U, перспективы на U и безрудный материал. Наиболее часто используемая классификация и скважинные диаграммы используют данные о соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

Определенные диапазоны на диаграммах соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6 и 7) являются "бесплодными/фоновыми", "аномальными" и "высокоаномальными/минерализованными" с диапазонами <30, от 30 до 100 и >100 соответственно. Диапазон "бесплодный/фоновый" охватывает глобальный диапазон фоновых значений, при этом значение отношения 18,7 представляет собой среднее значение для типичного материала земной коры, такого как океанический базальт. Другие диапазоны определены произвольно.

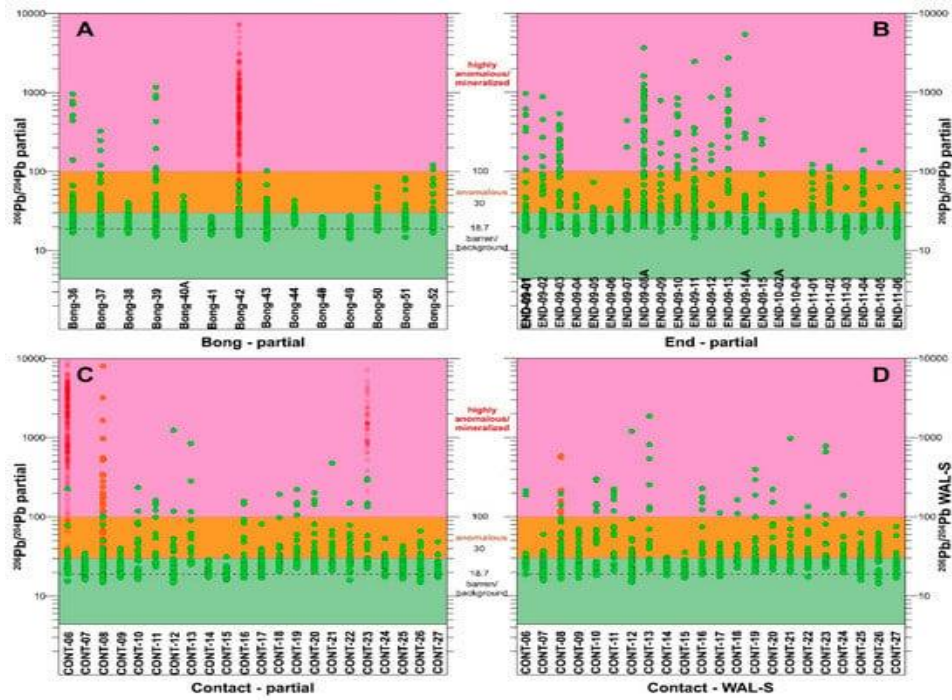


Рис. 6. Участки с несколькими скважинами в соотношении $Pb^{204}Pb$. (А) Месторождение Бонг-У, (В) Месторождение Энд-У, (С) Связь с U prospect, PAD; и (D) Связь с U prospect, WAL-S. Неминерализованные образцы выделены зеленым цветом, минерализованные образцы - красным и оранжевым. Цветные полосы представляют собой произвольное разделение диапазона соотношений от пустых/фоновых значений (< 30 , зеленый) через значения, считающиеся аномальными (30-100, оранжевый), до тех значений, которые считаются крайне аномальными, например, для минерализации (> 100 , розовый).

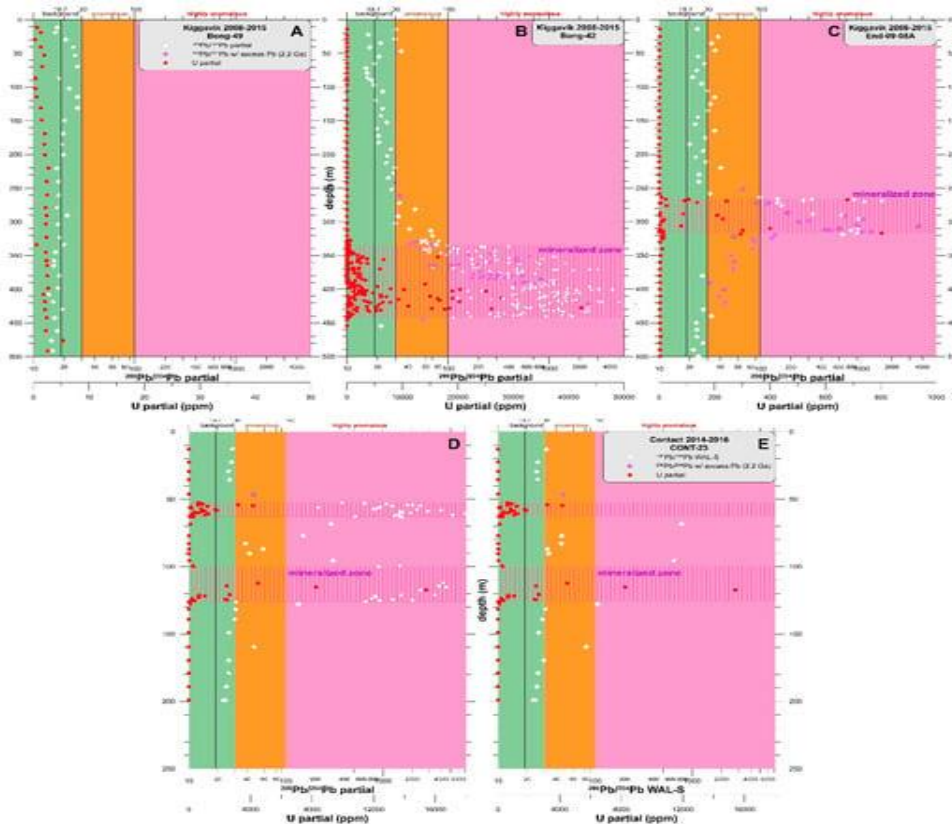


Рис. 7. Диаграммы избытка Pb в соотношении $^{206}Pb/^{204}Pb$. (А) Безрудная скважина Бонг-49, (В) минерализованная скважина Бонг-42, (С) минерализованный конец скважины 09-08А, (D) (Е) WAL-S. Фиолетовые ромбы - образцы с избыточным содержанием Pb; содержание U - красными кружками.

Графики с несколькими скважинами в соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6) иллюстрируют наличие "аномальных" и "высокоаномальных" соотношений в отдельных скважинах. Неминерализованные образцы из многих скважин месторождения Бонг-У (рис. 6А) и месторождения Энд-У (рис. 6Б) показывают "сильно аномальные" и "высокоаномальные" значения соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ очень похожие на минерализованные образцы из месторождения Бонг-У. Несколько скважин показывают только значения соотношения "голый/фоновый" и действительно лишены U-минерализации (например, Bong-46 и Bong-49, End-10-02A; рис. 6А, В соответственно), однако несколько других скважин показывают некоторые многообещающие значения соотношения "сильно аномальный" (Bong-50, рис. 6А). Данные WAL-S из Contact U prospect (рис. 6D) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD (рис. 6С).

Диаграммы "избытка Pb" в соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в скважине (рис. 7) представляют собой графики, показывающие значения отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в трассировке скважины. Содержание U в образцах также нанесено на график в справочных целях. Скважинные графики $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ иллюстрируют изменения исходных данных по изотопу Pb в зависимости от глубины скважины. Однако они не предоставляют информации о каком-либо "избыточном содержании Pb", т. е. Pb, которое не подтверждается количеством U, присутствующим в образце породы. "Скорректированные" графики $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ внутрискважинных графиков на рис. 7 подчеркивают те значения изотопов, которые также содержат 'избыточное содержание Pb'. Бонг-49 представляет собой безрудную фоновую скважину, расположенную на значительном расстоянии (~500 м) от основного месторождения Бонг (рис. 7А), все пробы, которые показали фоновые значения соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (т. е. <30). Бонг-42 - это хорошо минерализованная скважина, типичная для месторождения Бонг-У, содержащая рудную зону мощностью 108 м, которая включает пересечение 0,80% U_3O_8 на протяжении 42 м (рис. 7Б). Аномальный $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ значения Pb присутствуют в образцах Bong-42 с фоновым содержанием U, как выше, так и ниже минерализованной зоны, при этом получены значения более 4000. В этой зоне мощностью 200 м присутствуют повышенные значения отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, но за пределами минерализованной зоны также имеются образцы, содержащие "избыточный Pb". End-09-08А - это хорошо минерализованная буровая скважина (рис. 7С), типичная для месторождения End U. Подобно скважине Бонг-42, эта скважина содержит U-минерализованную зону мощностью более 52 м. Аномальные значения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ присутствуют в этих образцах с фоновым содержанием U как выше, так и ниже минерализованной зоны, при этом снова получены значения более 4000. В этой зоне мощностью 200 м с повышенными значениями отношения

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ также присутствуют образцы, содержащие "избыточный Pb", в основном залегающий ниже минерализованной зоны.

Диаграмма избытка Pb $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ по сравнению с $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ представлена на рис. 8. Точки данных PAD из районов залежей (Bong, End и Contact на рисунке 8А–С соответственно) преимущественно следуют траектории, которая в целом находится между кривой роста радиогенного Pb ~ 50 млн лет и кривой роста 250 млн лет. Многочисленные точки данных из района конечных залежей (рис. 8Б) показывают 'избыток Pb', не подтвержденный содержанием U в образцах. Данные из района месторождения Бонг (рис. 8А) и района контакта (рис. 8С, D) показывают гораздо более слабую тенденцию "избытка Pb", а данные WAL из контакта демонстрируют те же особенности, что и данные PAD.

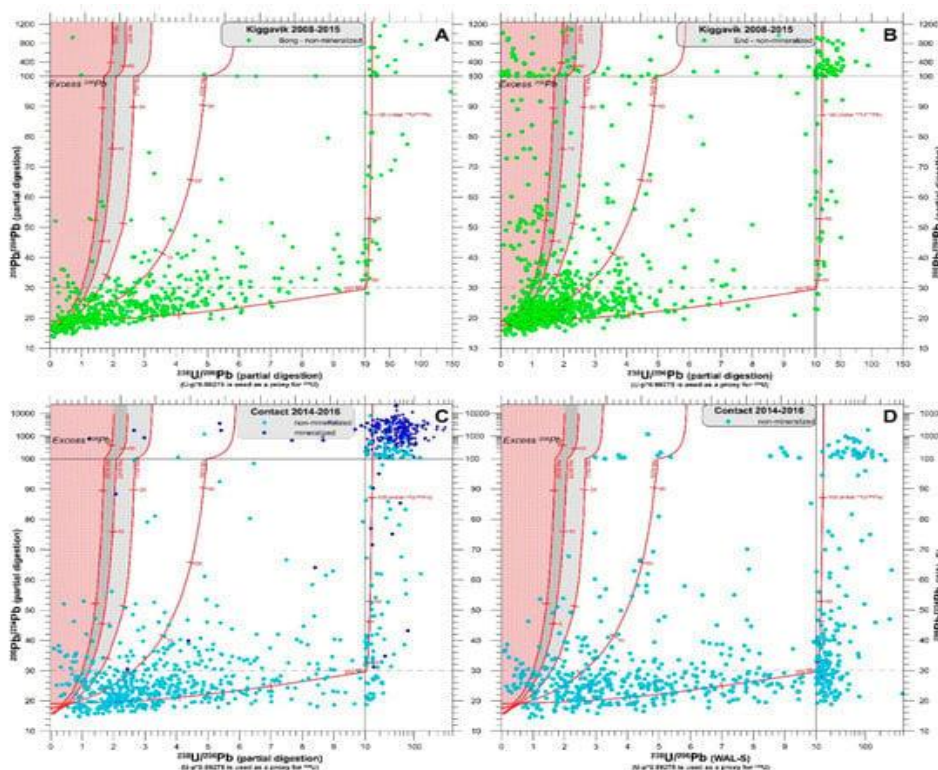


Рис. 8. Диаграммы избытка Pb "Holk" $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в сравнении с $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$. (А) Месторождение Бонг-У, неминерализованные образцы, PAD; (Б) Месторождение Энд-У, неминерализованные образцы, PAD; (С) Связь с U prospect, PAD; (D) Связь с U prospect, неминерализованные образцы, WAL-S. Розовые, темно-серые и светло-серые области - образцы, содержащие 'избыток Pb', кривые роста радиогенного Pb 2800 млн лет назад, 2200 млн лет назад и 1750 млн лет назад соответственно.

Аналогичным образом, определенные диапазоны на диаграммах соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 9-11) являются "пустыми", "слабо аномальными", "умеренно аномальными", "сильно аномальными" и "высокоаномальными/минерализованными" с диапазонами $>0,75$, от 0,75 до 0,6, от 0,6 до 0,4, от 0,4 до 0,2 и $<0,2$ соответственно. "Пустой" диапазон отражает значения нерадиогенного соотношения, обычно встречающиеся при поисках U, в то время как другие диапазоны отражают первичное и вторичное рассеивание радиогенного Pb.

Графики соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для нескольких скважин (рис. 9) иллюстрируют наличие низких значений соотношения в образцах из отдельных скважин на данной территории. Неминерализованные пробы из многих скважин месторождения Бонг-У (рис. 9А) и месторождения Энд-У (рис. 9Б) показывают "сильно аномальные" и "высокоаномальные" значения соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (например, Бонг-36, Бонг-38, Энд-09-08А, Энд-09-11 и другие), очень похожие на минерализованные пробы с месторождения Бонг-У. буровой-42. Данные WAL-S от Contact (рис. 9D) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD (рис. 9С).

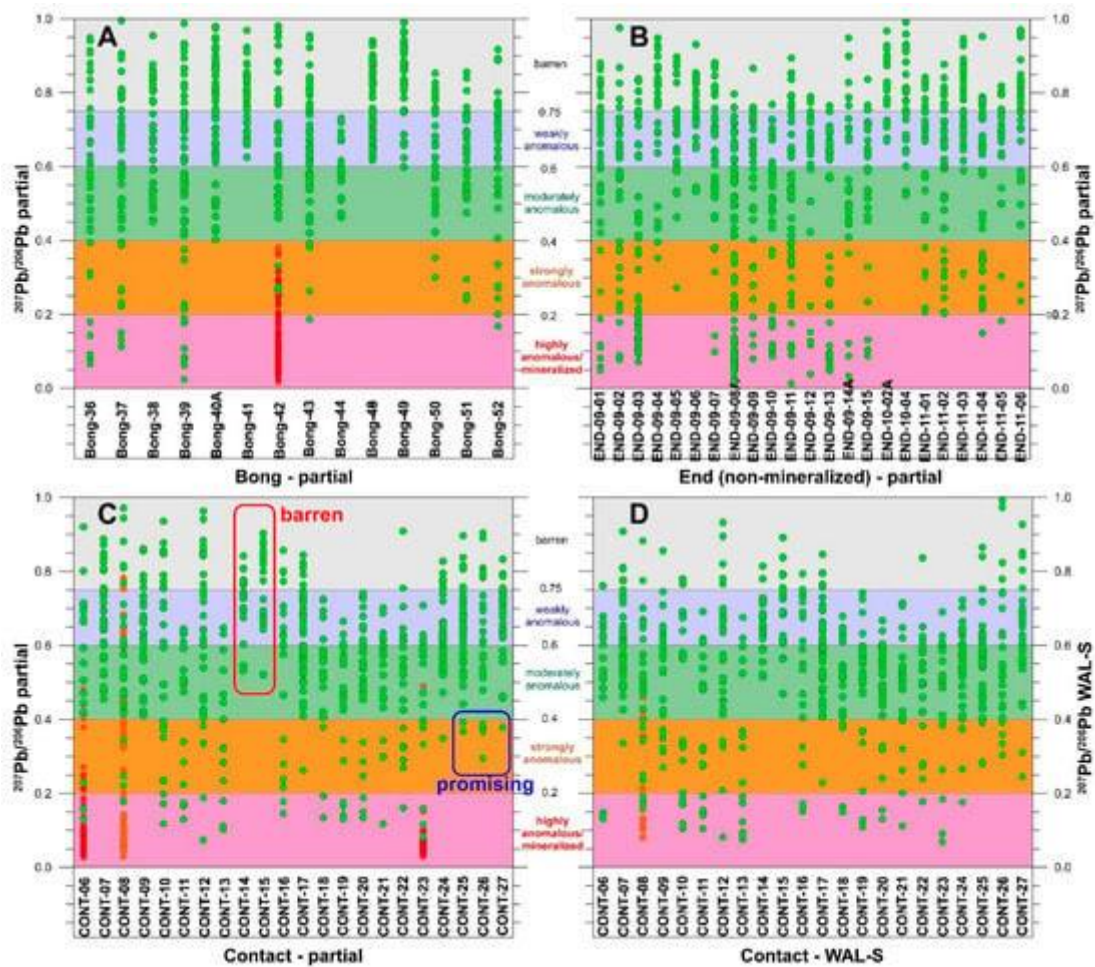


Рис. 9. Участки с несколькими скважинами в соотношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. (А) месторождение Bong U; PAD, (Б) месторождение End U, PAD, (С) Свяжитесь с U prospect, PAD (описания месторождений см. в тексте), и (D) Свяжитесь с U prospect, WAL-S. Неминерализованные образцы выделены зеленым цветом, минерализованные образцы - красным и оранжевым.

Цветные полосы представляют собой произвольное разделение диапазона соотношений от пустых/фоновых значений (серый), через значения, которые считаются слабо, умеренно и сильно аномальными (синий, зеленый и оранжевый соответственно), до тех значений, которые считаются сильно аномальными, например, обнаруживаемыми в минерализации (розовый).

На диаграммах соотношения U и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 10) для территории проекта Киггавик "сильно аномальные" и "сильно аномальные" значения отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (от 0,4 до 0,2, от 0,2 до 0, соответственно) обычно соответствуют повышенным значениям U как в данных TAD, так и в данных PAD (рис. 10А, В соответственно). Однако многие образцы с низким

содержанием U также демонстрируют низкие значения отношения ($<0,4$; "сильно аномальный" и "высокоаномальный"; черные прямоугольники на рисунке 10B–D), что наводит на мысль о радиогенной сигнатуре, связанной с минерализацией U. Ожидается обилие данных из минерализованных районов (например, как в данных PAD, так и в данных WAL для перспективной зоны контакта U, рис. 10C, D), которые отображают "сильно аномальные" и "высокоанномальные" отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Данные WAL демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD. Важно отметить, что имеются многочисленные образцы, содержащие только низкие количества U, которые возвращают значения соотношения "сильно аномальный" и "сильно аномальный" (рис. 10A,B). В отличие от районов с минерализацией U, другие районы, которые до настоящего времени были признаны бесплодными, демонстрируют в лучшем случае лишь несколько "сильно аномальных" значений, уступающих многочисленным фоновым значениям ("бесплодный", "слабо аномальный") и меньшие "умеренно аномальные" значения.

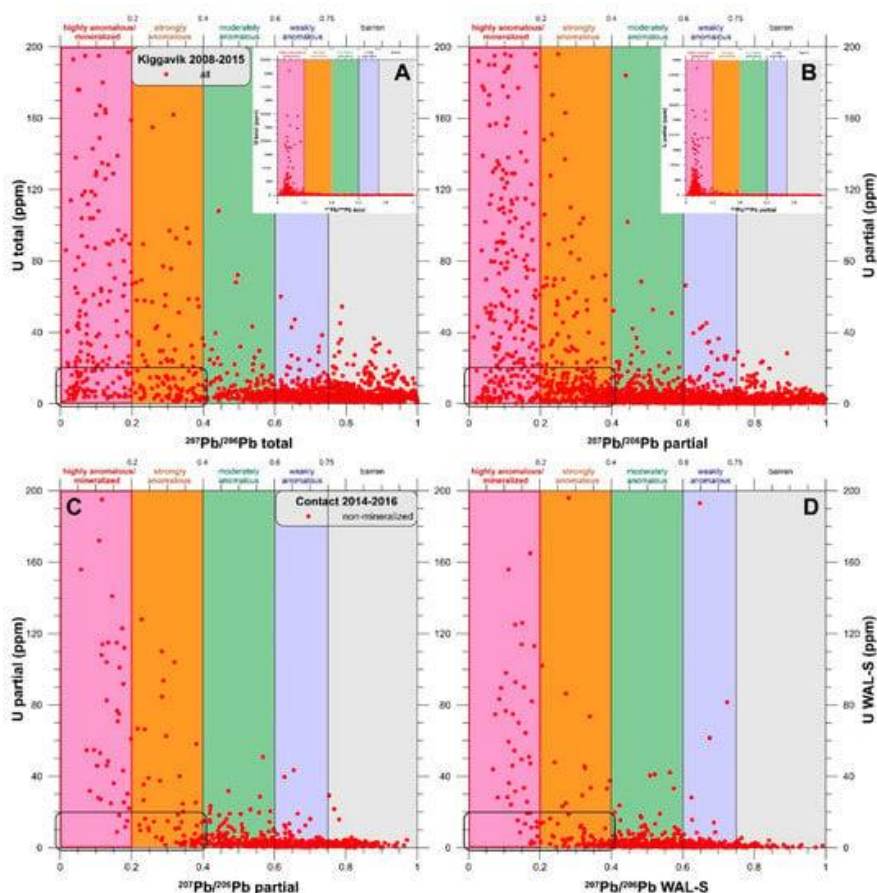


Рис. 10. Диаграммы U в сравнении с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (A, B) Образцы района Киггавик, TAD; (C) Перспективный объект Contact U, неминерализованный, (D) контакт U, неминерализованный, WAL-S.

Графики соотношения U и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в скважине (рис. 11) объединяют те же данные о соотношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в скважине, которые представлены на рисунке 9, с данными по U в скважине (только для PAD). Соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, представленные в бесплодной скважине

Бонг-49 (рис. 11А), почти все "бесплодные", и лишь несколько "слабо аномальных" значений разбросаны вблизи вершины скважины. Напротив, соотношения в образцах из минерализованной скважины Бонг-42 показывают обильные "умеренно аномальные" и "сильно аномальные" значения почти на 200 м выше широкого минерализованного пересечения (рис. 11Б). Почти все минерализованные пробы показывают значения соотношения 'сильно аномальное/минерализованный', обычно $<0,1$, а некоторые неминерализованные пробы, содержащие повышенное содержание U, показывают значения соотношения "сильно аномальный", особенно чуть выше минерализованного пересечения. Данные, полученные с помощью данных PAD для перспективы контакта (продолжение минерализованного бурения скважины-06), аналогичны тем, которые наблюдаются в Bong-42, и они почти идентичны тем, которые получены из данных WAL-S (рис. 11С, D соответственно).

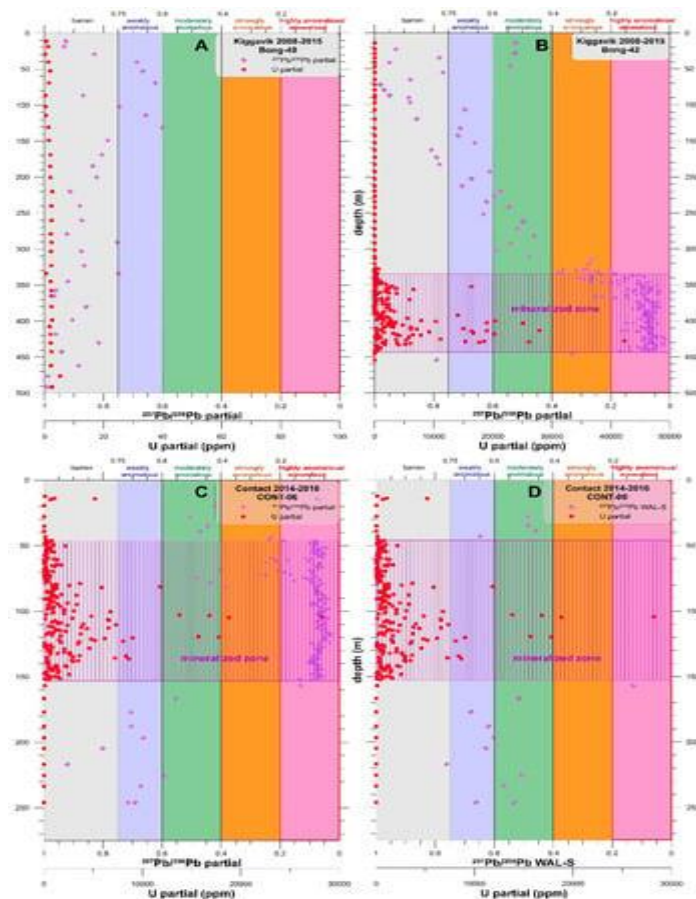


Рис. 11. Диаграммы избытка Pb в соотношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в скважине. (А) Бесплодная скважина Бонг-49, (В) минерализованная скважина Бонг-42, (С) минерализованная скважина -06, PAD; и (D) -06, WAL-S.

4.3. Геохимия Pb-изотопного признака: Связь с потенциальным оруденением.

Оценка геохимии дисперсии Pb-изотопов pathfinder как вектора минерализации U типа «несогласия», была проведена на образцах, взятых из скважин в районе перспективного месторождения контакта U, с использованием данных по Pb-изотопам, полученных как при отборе/выщелачивании образцов PAD, так и WAL. Перспективная минерализация контакта

залегает в архейских ортогнейсах и структурно подстилается блоком окремненной кварцевой брекчии. Оболочка минерализации простирается вдоль северо-западного структурного тренда Эндрю-Лейк. Графики с использованием отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ или отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ были использованы для иллюстрации рудоперспективных тенденций, которые наблюдаются в данных по изотопам Pb из этих образцов.

На участке с несколькими скважинами в соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, перспективная зона контакта U демонстрирует хороший потенциал минерализации с наличием обильных значений соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6C), с минерализованными U образцами (от 200 до 31 400 ppm U) из буровых скважин CONT-06, CONT-08 и CONT-23 отображаются "крайне аномальные" значения соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Несколько скважин, расположенных к северу, вдали от месторождения U, дают только значения соотношения "голый/фоновый" и действительно лишены минерализации U (например, максимумы 21 и 16 ppm U в CONT-14, CONT-15 соответственно; рис. 6C, D). Однако несколько других скважин, расположенных к юго-западу и северо-востоку вдоль простираения проспекта U, также пусты (например, максимум 26 ppm U в CONT-25, CONT-26, CONT-27; рис. 6C, D), но они дают некоторые многообещающие значения "сильно аномального" соотношения и расположены в пределах интересной аномалии с низкой гравитацией (рис. 2B). Данные WAL-S от Contact (рис. 6D) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD (рис. 6C).

Диаграммы "избытка Pb" в соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для скважины CONT-23 с умеренной минерализацией в перспективном районе контакта U, содержащей две минерализованные зоны, одна с 0,80% U_3O_8 на глубине 25 м, приведены на рисунке 7D, E для данных PAD и WAL-S соответственно. Аномальные или высокоаномальные значения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (PAD; рис. 7D) присутствуют между двумя зонами в образцах, содержащих близкие к фоновому уровню содержания U. В этой зоне мощностью ~ 80 м с повышенными значениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ присутствует единственный образец, содержащий "избыточный Pb", расположенный непосредственно над верхней минерализованной зоной. Данные WAL-S (рис. 7E) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD.

Диаграммы "избытка Pb" $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ по сравнению с $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ для перспективы контакта U (рис. 8C, D) показывают гораздо более слабую тенденцию "избытка Pb", чем для месторождений Бонг или Энд (рис. 8A, B). Интересно, что большинство минерализованных образцов с контактного участка в верхнем правом квадранте диаграммы, ниже кривой роста за 50 млн лет, имеют очень высокие значения соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (от 800 до 25 000). Данные WAL-S (рис. 8D) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD (рис. 8C).

График с несколькими скважинами в соотношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для перспективной зоны контакта U (рис. 9C) показывает высокий потенциал минерализации с обильными "сильно аномальными" и "высокоанномальными" значениями отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 9C, D) в неминерализованных образцах. Образцы с минерализацией U из скважин CONT-06, CONT-08 и CONT-23 демонстрируют крайне аномальные значения соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Что еще более важно, в то время как несколько скважин показывают фоновые значения соотношения и являются безрудными (например, -14, -15; рис. 9C), несколько других буровых скважин также безрудны, но они показывают некоторые многообещающие значения соотношения "сильно аномальных" (-25, -26, -27; рис. 9C). Те же особенности также присутствуют на графике с несколькими скважинами в соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6C). Данные по соотношению WAL-S $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 9D) демонстрируют те же характеристики, что и данные PAD (рис. 9C).

На диаграммах соотношения U и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для перспективной зоны контакта U присутствуют те же характеристики, что и при использовании данных PAD и WAL (рис. 10C, D соответственно). Ожидается обилие точек данных из минерализованных районов, которые демонстрируют "сильно аномальные" и "высокоанномальные" отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, и многочисленные значения "сильно аномальных" и "высокоанномальных" соотношений в образцах, содержащих только низкие количества U (внутри черного прямоугольника на рисунке 10C, D), представляющие аномальные соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, которые не подтверждаются данными по содержанию U в образцах. Данные WAL (рис. 10D) демонстрируют те же характеристики, что и данные о частичном расщеплении (рис. 10C).

Графики соотношения U и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в скважине с использованием данных PAD и WAL для минерализованной скважины CONT-06 (рис. 11C, D соответственно) аналогичны минерализованной скважине на месторождении Бонг (Бонг-42, рис. 11B, данные PAD), при этом минерализованные образцы возвращают значения соотношения 'сильно аномальный/минерализованный' около 0,1 по данным PAD. Значения соотношения "сильно аномальный" и "умеренно аномальный" присутствуют выше минерализованного интервала мощностью 105 м, в то время как ниже минерализованного интервала присутствуют значения 'слабо аномальный' и "умеренно аномальный". Структура данных, полученных для неминерализованных образцов с помощью данных WAL-S (рис. 11D), почти идентична данным PAD.

Двумерная (2D) карта в плане с соотношением $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 12A) иллюстрирует пространственные вариации x-y скорректированных данных по изотопам Pb. Расположение аномальных соотношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ хорошо очерчивает минерализационную оболочку, а также расширение аномалий погружения в скважинах CONT-10 и CONT-11, расширение

аномалий в скважинах и аномальные значения в скважинах CONT-25, -26 и -27 (рис. 9С). Значения отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ обеспечивают несколько большую изотопную аномалию, как выше (NW), так и ниже (SE) минерализации, чем соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (см. ниже). Образцы, содержащие 'избыточный Pb', почти все расположены над основной частью минерализованной оболочки, которая содержит большую часть минерализации.

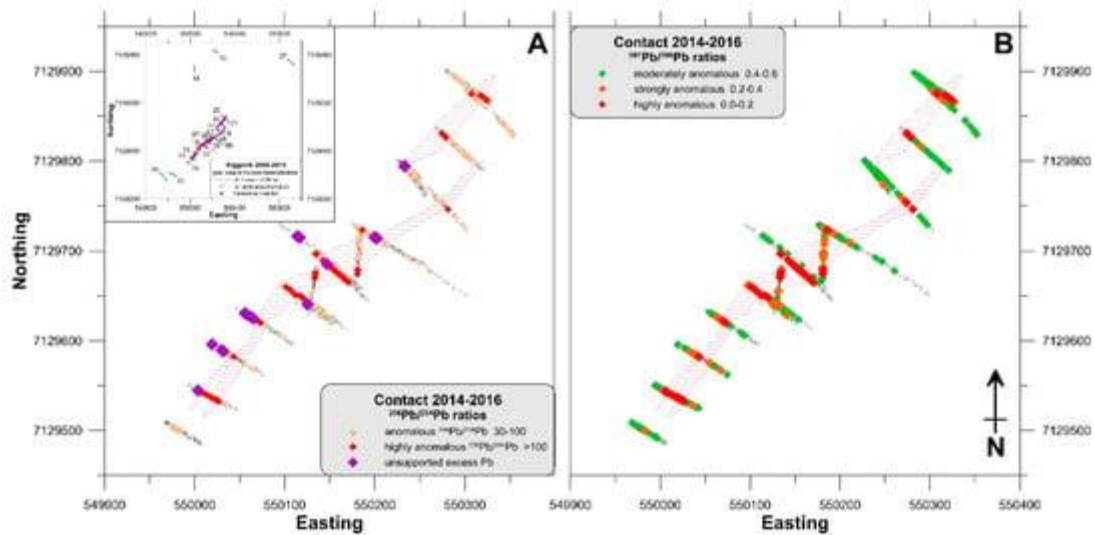


Рис. 12. Двумерные (2D) карты перспективного участка Contact U с изотопом Pb. (А) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, PAD; (В) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, PAD. Заштрихованные области - минерализованная оболочка, которая простирается от поверхности примерно на 150 м ниже.

Соотношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ на карте 2D (рис. 12В) иллюстрирует пространственные различия по x-y в данных по изотопам Pb. Как ожидалось и как уже отмечалось в данных о соотношении $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, сильно аномальные значения соотношения очерчивают основную оболочку минерализации, которая встречается в пределах значительной аномалии с низкой гравитацией. Аномальные значения в буровых скважинах CONT-10 и CONT-11 также указывают на то, что протяженность аномалии снижается к юго-востоку, что, вероятно, отражает структурный контроль. Две группы пустых буровых скважин (-25 и -26, -27), расположенных к юго-западу и северо-востоку вдоль простираения основного оруденения (рис. 12А; рис. 13В), содержат несколько перспективных 'сильно аномальных' образцов. Эти скважины находятся в пределах аномалий средней и низкой гравитации, которые пока плохо проверены. Еще одна аномалия низкой гравитации, выявленная скважинами CONT-14 и CONT-15, расположенными к северо-западу от основного месторождения, является безрудной и возвращает неперспективные фоновые соотношения Pb-изотопов (рис. 9С и рис. 13В).

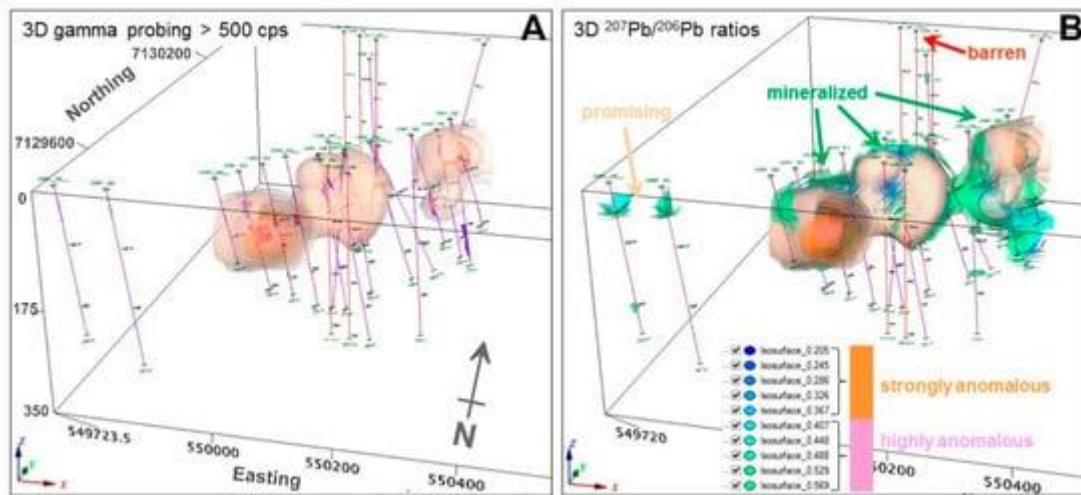


Рис. 13. Гамма-зондирование U и трехмерные (3D) модели изотопа Pb на перспективном участке контакта U. (А) Количество гамма-лучей U (cps), при этом интенсивность оранжевого оттенка пропорциональна гамма-данным; (В) значения отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, наложенные на гамма-данные, с зелеными и синими изоповерхностями, представляющими значения отношения, соответствующие оранжевому (сильно аномальному) и розовому (сильно аномальному) полям на рисунках 9, 10 и 11.

На рисунке 13А,В показаны трехмерные (3D) диаграммы радиометрического (минерализованного) следа перспективного участка контакта U (гамма cps) и распределения отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ соответственно. Соотношения радиогенных изотопов Pb (рис. 13В) образуют ореолы за пределами минерализованной области, изображенной на рисунке 13А, и показывают, что существует потенциал минерализации как в верхней, так и в нижней части минерализованной зоны.

5. Обсуждение.

Применение метода Pb-изотопного поиска в песчаниках широко использовалось при разведке урана в бассейне Атабаска в Саскачеване. Первоначально в методе использовались данные о частичном кислотном расщеплении (PAD), но метод был усовершенствован за счет замены PAD методом слабокислотного выщелачивания (WAL) для частичного выщелачивания измельченного материала для извлечения адсорбированных ионов. Частичное выщелачивание методом WAL использовалось для облегчения извлечения адсорбированных подвижных металлов из вмещающих их минералов, таких как глинистые минералы, а не из слоя породообразующих минералов в образце. Однако анализы WAL требуют много времени и дороги (> 75 долларов США/проба только для данных по изотопам Pb) по сравнению с быстрым и относительно недорогим литогеохимическим анализом ICP-MS (около 60 долларов США/проба для набора из более чем 60 элементов, включая Pb-изотопы) после 3-или 4-кислотного TAD и/или 2-кислотного PAD, которые обычно используются при отборе проб при поисках и проектах по геохимии. На сегодняшний день нет общедоступной информации,

которая сравнивала бы данные по изотопам ^{208}Pb с обширными геохимическими данными ICP-MS по изотопам ^{208}Pb , особенно данными PAD.

5.1. Оценка данных по изотопам ^{208}Pb , методами расщепления и выщелачивания.

TAD против PAD.

Хорошо известно, что данные об общем разложении (TAD) имеют ограниченное применение для оценки рассеивания элементов, поскольку они включают ^{208}Pb , полученный в результате распада ^{235}U , присутствующего в резистатных минералах, находящихся в породе (например, цирконе), который маскирует сигнал подвижного (адсорбированного) изотопа ^{208}Pb . Тем не менее, было проведено сравнение данных TAD и данных PAD, поскольку они обычно доступны в многоэлементных аналитических пакетах ICP-MS. Оба набора данных показывают распределение, близкое к логарифмически нормальному, но значения, полученные с помощью TAD, значительно выше значений, полученных с помощью PAD (рис. 3) в результате полного растворения породы по сравнению с частичным растворением. Следствием TAD является зависящее от литологии выделение дополнительного содержания элементов из резистатных минералов, таких как циркон, турмалин и другие силикатные минералы, по сравнению с менее агрессивным выщелачиванием пласта. Изотопы ^{208}Pb , выделяемые из этих минералов, связаны с их образованием, а не с каким-либо более поздним первичным или вторичным рассеиванием, которое является целью метода поиска ^{208}Pb -изотопов. Наблюдаемая разница между результатами расщепления больше в метаморфическом материале фундамента, чем в ортокварцитовом песчанике Атабаска из-за большего количества этих резистатных минералов в литологии фундамента. Средние значения для данных TAD и PAD значительно различаются как на 95 и 98% уровнях значимости. Таким образом, статистически маловероятно, что данные TAD и данные PAD получены из распределений с одинаковыми средними значениями по совокупности.

Использование соотношений изотопов устраняет некоторые эффекты различий в количествах, наблюдаемых между методами расщепления, но данные по ^{208}Pb имеют более низкую аналитическую точность, чем по другим изотопам ^{208}Pb , из-за их содержания, как правило, более близкого к пределу обнаружения, и наблюдается относительно слабая корреляция результатов TAD и PAD ^{208}Pb (рис. 3). Из-за более низкой точности соотношения с использованием ^{208}Pb (например, $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$; рис. 3D) менее надежны, они демонстрируют больший разброс на графиках TAD по сравнению с PAD и, следовательно, обеспечивают меньшую достоверность интерпретации при поисках. Данные по соотношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ более надежны, данные показывают относительно стабильную зависимость TAD от PAD и меньший, хотя и все еще относительно широкий, разброс данных, особенно в середине графика

(рис. 3E). В целом, эти характеристики указывают на то, что данные TAD не следует использовать при поиске Pb-изотопов в песчанике или в фундаменте. Данные PAD лучше подходят для поиска Pathfinder с использованием изотопов Pb; однако они также получены в результате разбавления царской водкой, которое является более агрессивным, чем WAL.

Варианты WAL.

Хотя данные PAD лучше подходят для поиска Pathfinder с изотопом Pb, чем данные TAD, использование данных WAL вместо данных PAD более полезно при разведке U. Это связано с тем, что слабокислотное выщелачивание менее агрессивно и проводится на материале с мелкими фракциями, предназначенном для глинистых минералов, а не на измельченной пробной пульпе, в которой содержание глинистых минералов разбавлено основными породообразующими минералами. В этом исследовании использовались два варианта WAL. Данные WAL из QFIR были получены после выщелачивания 2%-ной азотной кислотой, в то время как данные WAL из SRC были получены после выщелачивания 5%-ной азотной кислотой. Оба набора данных показывают логарифмически нормальные распределения, и анализы WAL-S и WAL-Q обеспечивают очень схожие объемы извлечения изотопа Pb (рис. 5A-C; табл. 1), оба обеспечивают меньшее извлечение Pb, чем PAD. Средние значения для данных WAL-S и WAL-Q существенно не отличаются, поэтому статистически вероятно, что данные WAL-S и данные WAL-Q взяты из распределений с одинаковыми средними значениями по совокупности. Оба соотношения изотопов ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) показывают аналогичный разброс данных (рис. 5D, E), но ^{207}Pb /данные о соотношении ^{206}Pb , по-видимому, более надежны для использования при интерпретации результатов поисков. При разнообразии подготовленных графиков данных (рис. 5) эти два набора данных WAL существенно не отличаются, и, таким образом, любой набор данных может быть использован для сравнения результатов WAL по Pb-изотопу с результатами PAD.

PAD против WAL: залежи Bong и End.

Что касается сравнения результатов по TAD и PAD по изотопу Pb, значения, полученные с помощью PAD, значительно превышают значения, полученные с помощью любого из WAL (рис. 4) в результате частичного растворения породообразующих минералов в PAD по сравнению с извлечением только адсорбированных подвижных металлов с помощью WAL. Набор данных PAD показывает распределение, близкое к логарифмически нормальному, в то время как данные WAL распределены логарифмически нормально; кроме того, что касается сравнения TAD и PAD, сравнение PAD и WAL показывает, что статистически маловероятно, что данные PAD и данные WAL получены из распределений с равными средними значениями по совокупности. Значения данных по ^{204}Pb PAD и WAL также более слабо коррелируют, чем

значения для ^{206}Pb и ^{207}Pb , с большим разбросом данных в результатах по ^{204}Pb . Как отмечалось выше, использование соотношений изотопов устраняет некоторые эффекты количественных различий, наблюдаемых между методами расщепления PAD и WAL, но соотношения с использованием ^{204}Pb менее надежны и демонстрируют большой разброс (отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, рис. 4D) по сравнению с данными о соотношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 4E) при относительно постоянном соотношении PAD и WAL.

Различные графики данных с использованием отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ были использованы эмпирическим образом, чтобы проиллюстрировать сходство между набором данных PAD и набором данных WAL. Диаграммы “избытка Pb” Холка (график $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -р против $^{238}\text{U}^*/^{206}\text{Pb}$ -р) для неминерализованных образцов из месторождений Бонг, Энд и перспективы контакта (рис. 8A–C) показывают, что многие точки данных проходят по траектории, которая в целом находится между кривой роста радиогенного Pb ~ 50 млн лет и кривой роста 250 млн лет. Этот путь данных указывает на то, что свинец был потерян из U-минералов примерно через 50-250 млн лет после образования U-минералов, т. е. событие потери Pb (или серия событий потери Pb), произошедших относительно вскоре после образования U-минералов. Диаграмма, иллюстрирующая данные контактной площадки (рису. 8C), по существу, такая же, как диаграмма, показывающая данные WAL (рис. 8D), изображающая те же особенности: точки данных следуют той же кривой роста, и точки данных попадают в те же области диаграммы, в частности, та же схема попадания точек данных в поле “избыток Pb”. Эта последняя особенность важна при поисках урана, потому что обилие точек данных в этой области указывает на степень, в которой образцы демонстрируют “избыток Pb”, не подтвержденный содержанием U в образцах.

Рудовмещающий песчаник обычно содержит радиогенные изотопы $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (>30; часто >100), при этом изотопный состав Pb обычно не подтверждается количеством U в песчанике. Этот ‘избыток Pb’ интерпретируется как наложение на исходную породу в результате перемещения Pb и U через породы. Эта закономерность согласуется с внесением радиогенного Pb из U-залежей вовремя син-и/или постминерализационных флюидов явлений (первичное и/или вторичное рассеивание). Наличие этих радиогенных $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в соотношениях показывает, что песчаник был проницаем для более поздних флюидов. Данные по фундаменту Киггавик также демонстрируют эту особенность, как в данных PAD, так и в данных WAL, на диаграммах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в скважинах, представленных на рисунках 6 и 7. Диаграммы с несколькими скважинами для некоторых месторождений Бонг (рис. 6A), Конечное месторождение (рис. 6B) и Перспективный контакт (рис. 6C, D) показывают, что неминерализованные пробы в пределах этих месторождений и перспективных участков также

показывают высокие значения отношения, как в данных PAD, так и в данных WAL, в том же диапазоне, что и минерализованные пробы из скважин Bong-42, CONT-06 и CONT-23. Важно отметить, что для разведки урана несколько других буровых скважин, которые являются бесплодными, показывают некоторые многообещающие значения "сильно аномальных" коэффициентов (например, Bong-50, рис. 6А). Наличие избытка Pb согласуется с внесением этих дочерних изотопов из близлежащих месторождений U во время постминерализационных флюидных явлений. Несколько буровых скважин дают только значения соотношения 'пустота/фон' и действительно лишены U-минерализации (например, Bong-46 и Bong-49, End-10-02А). График "избытка Pb" отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в скважине для Бонг-49 (рис. 7А), расположенный вдали от минерализованной зоны Бонг, показывает, что все значения проб попадают в 'фоновое' поле и почти все близки к среднему значению земной коры 18,7. Ни в одной пробе не содержится 'избыток Pb'. Аналогичным образом, конец скважины 10-04, расположенный на расстоянии >160 м от основного конечного месторождения U минерализации, вернул "фон" к очень слабо "аномальному" $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ значения Pb во всех образцах, ни в одном из которых не содержится "избыток Pb". Напротив, хорошо минерализованные скважины Бонг-42 и ЭНД-09-08А (рис. 7Б, В соответственно) типичны для месторождений Бонг и Энд U, при этом ЭНД-09-08А содержит минерализованный слой 0,65% U_3O_8 на протяжении 48,5 м. "Аномальные" и "высокоаномальные" значения отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ присутствуют во многих образцах, которые содержат фоновое содержание U, как выше, так и ниже минерализованных зон в этих скважинах. В этом блоке мощностью >350 м с повышенными значениями отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в END-09-08А присутствуют многочисленные образцы, содержащие "избыточный Pb", особенно в породе, расположенной ниже минерализованной зоны. Те же особенности наблюдаются в умеренно минерализованной скважине на перспективном участке контакта U, которая содержит две минерализованные зоны, одна с содержанием 0,80% U_3O_8 на протяжении 25 м (-23; рис. 7Д, Е), хотя и в меньшей степени. Значения от "аномальных" до "высокоаномальных" $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ присутствуют как в данных PAD, так и в данных WAL между двумя зонами в образцах U (близких) к фоновому уровню. Что также присутствует в этом блоке мощностью ~ 80 м с повышенным содержанием $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Значения Pb представляют собой единичный образец, содержащий "избыточный Pb", расположенный непосредственно над верхней минерализованной зоной, что соответствует рассеянию этих дочерних изотопов во время постминерализационных флюидных явлений.

На диаграммах соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ песчаник вблизи залежей показывает сильно аномальные значения соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, которые хорошо соответствуют повышенным значениям U, но некоторые образцы демонстрируют низкие значения соотношения,

указывающие на сильную радиогенную сигнатуру, в образцах с низким содержанием U. В Киггавике перспективные месторождения в фундаменте, такие как Бонг, Энд, Эндрю Лейк, Киггавик Мейн и Контакт, также содержат большое количество образцов, демонстрирующих "крайне аномальные" изотопные признаки $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, особенно в образцах, также содержащих повышенное содержание U (рис. 10А, Б). Однако существуют также многочисленные "высокоаномальные" и "сильно аномальные" образцы, которые содержат лишь небольшое количество U. Таким образом, эти аномальные соотношения Pb и изотопов не подтверждаются содержанием U, что позволяет предположить, что радиогенный Pb был подвижным и происходил из источника с U-минерализацией, расположенного вдали от образца, или что сам материал образца потерял U. Образцы из других районов, которые на сегодняшний день признаны явно безрудными, обычно показывают только значения соотношения 'бесплодные' и 'слабо аномальные', и лишь в редких случаях значения соотношения "сильно аномальные". Данные из перспективной зоны контакта U (рис. 10С: PAD; 10D: WAL) демонстрируют аналогичное количество точек данных как из данных PAD, так и из данных WAL, которые имеют "сильно аномальные" соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Также имеются многочисленные пробы, которые показывают "сильно аномальные" и 'высокоаномальные' соотношения и которые содержат лишь небольшое количество U. Однако количество и пропорция проб из зоны контакта, попадающих на эти очень перспективные месторождения, меньше, чем те, которые наблюдаются для месторождений U, таких как Бонг и Энд.

Диаграммы соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для нескольких скважин Kiggavik иллюстрируют расположение образцов, содержащих 'сильно аномальные' и "высокоаномальные" соотношения изотопов Pb в отдельных буровых скважинах в пределах данной области. Диаграммы $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для некоторых скважин месторождений Бонг (Бонг-36, Бонг-37, Бонг-52; рис. 9А), Концевого месторождения (END-09-08А, END-09-11; рис. 9В) и контактной перспективы (рис. 9С). показывают, что неминерализованные пробы в пределах этих месторождений и перспективных зон также имеют низкие коэффициенты "сильно аномальных" и "высокоаномальных" значений, которые находятся в том же диапазоне, что и минерализованные пробы из буровых скважин Бонг-42, КОНТ-06 и КОНТ-23. Другие скважины, которые являются безрудными, такие как Бонг-41, Бонг-48, Бонг-49, End-10-02А и CONT-15, имеют только 'бесплодные' и "слабо аномальные" значения. Пробы из нескольких неминерализованных скважин на контактной площадке (-25, -26, -27; рис. 9С) показывают некоторые 'сильно аномальные' значения соотношения, предполагающие, что этот район обладает многообещающим потенциалом для минерализации U или что в этом районе произошла повторная мобилизация ранее существовавшей минерализации. Данные контактной

Площадки для неминерализованных образцов (рис. 9С) дают по существу ту же диаграмму, что и сопоставимые данные WAL (рис. 9D), с одинаковыми характеристиками, присутствующими на обоих.

Соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, представленные на графике безрудной скважины Бонг-49 (рис. 11А), почти все "бесплодны", так же как и соотношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и U в скважине, только с несколькими 'слабо аномальными' образцами. Значения отношения проб из минерализованной скважины Бонг-42 демонстрируют иную закономерность, с обильными "умеренно аномальными" и "сильно аномальными" значениями в зоне шириной почти 200 м, расположенной выше широкого минерализованного пересечения, при этом значения отношения неуклонно снижаются по направлению к минерализованной зоне, где некоторые неминерализованные образцы демонстрируют значения отношения "сильно аномальных" непосредственно над минерализованным пересечением (рис. 11Б). Как и ожидалось, почти все минерализованные пробы показывают значения соотношения 'сильно аномальный/минерализованный', обычно $<0,1$. Графики минерализованного ствола скважины CONT-06 (рис. 11С: данные PAD; 11D: данные WAL) аналогичны таковым для минерализованного ствола скважины Bong-42 (рис. 11В), при этом минерализованные образцы показывают значения соотношения 'высоко аномальный/минерализованный' около 0.1. Значения соотношения "Сильно аномальный" и "умеренно аномальный" присутствуют как в данных PAD, так и в данных WAL, выше минерализованного интервала шириной 105 м, в то время как ниже минерализованного интервала присутствуют значения 'слабо аномальный' и "умеренно аномальный".

На всех представленных диаграммах соотношения Pb-изотопов было продемонстрировано, что данные по Pb-изотопам демонстрируют систематические тенденции, связанные с рассеянием U минерализации. Данные PAD из неминерализованных проб также показывают те же закономерности данных, что и данные WAL, хотя абсолютные количества изотопов Pb, извлеченных из проб, значительно различаются при выщелачивании PAD и WAL. Например, диаграмма Холка "избыток Pb" для данных контактной Площадки (рис. 8С) по существу такая же, как диаграмма, показывающая данные WAL (рис. 8D), изображающая те же особенности, в частности, тот же рисунок точек данных, попадающих в поле "избыток Pb". Данные PAD также имеют те же характеристики, что и данные WAL, на других иллюстративных диаграммах соотношения Pb-изотопов (рис. 6, 7, 9, 10 и 11). В то время как выщелачивание WAL нацелено на извлечение адсорбированных подвижных металлов, а обработка PAD позволяет выщелачивать эти металлы, а также некоторые металлы из частично растворенных нерезистентных минералов, очевидно, что влияние разбавления на изотопную

характеристику Pb в результате частичного растворения основных породообразующих минералов невелико. Таким образом, на практике оказывается, что данные PAD могут использоваться в качестве прокси для данных WAL, если данные WAL недоступны, особенно данные по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

5.2. Геохимическая оценка дисперсии Pb-изомона Pathfinder: Contact prospect

Как показано выше, данные WAL и данные PAD из Contact prospect отображают одни и те же характеристики на представленных диаграммах, несмотря на различия в абсолютных количествах Pb-изотопов. На 2D-виде в плане участка контакта U prospectу аномальные значения обоих соотношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ очерчивают основную оболочку минерализации (данные PAD; рис. 12А,В соответственно). Здесь значения отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, по-видимому, образуют несколько большую аномалию, чем значения отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, с обилием 'аномальных' и 'высокоаномальных' значений. Присутствуют образцы, содержащие 'избыток Pb', причем почти все они структурно залегают выше минерализованной оболочки. Хотя в контактных пробах есть значения, которые находятся в поле 'избыток Pb' на диаграмме 'Холк', их количество и пропорция ниже, чем для залежей Бонг и Энд. Эта характеристика может отражать возможную разницу в количестве минерализации между залежами и перспективой. Количество точек данных по минерализованным образцам в верхнем правом квадранте этой диаграммы (рис. 8С), расположенный ниже кривой роста за 50 млн лет, предполагает, что произошла относительно недавняя ремобилизация U. Оба соотношения Pb-изотопов также показывают расширение аномалии, понижающееся к юго-востоку в неминерализованном материале, вероятно, отражающее структурный контроль в буровых скважинах CONT-10 и CONT-11. На юго-западе и северо-востоке вдоль простирания основного оруденения образцы из нескольких скважин (-25, -26, -27) содержат предполагаемые 'сильно аномальные' значения отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 9С, D), что позволяет предположить, что эти скважины демонстрируют потенциал минерализации в этих районах. Другой целевой район с аномалиями низкой гравитации к северу от контакта U минерализация показывает неперспективные фоновые соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в безрудных скважинах CONT-14 и CONT-15 (рис. 6С, D и рис. 9С, D), которые пересекали выявленную гравитационную аномалию. Фоновые значения U и отсутствие многообещающих 'сильно аномальных' значений соотношения Pb-изотопов в этих двух скважинах понижают рейтинг целевого района поисков.

Доля проб из контактной зоны, попадающих в очень перспективное поле 'высокоаномальных' соотношений $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, ниже, чем наблюдается для месторождений U, таких как Бонг и Энд; однако 3D-изображение отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в контактной зоне U (рис. 13Б) показывает наличие высокоаномальных соотношений, расположенных за пределами

минерализованной области, которое изображено на рис. 13А по контурам гамма-зондирования >500 cps. Область аномалий соотношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ за пределами минерализованной зоны имеет ограниченный охват и обычно не простирается до конца скважин, а область аномалий соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ имеет примерно такую же протяженность. Однако эти аномальные значения полезны для оценки скважин и плохо очерченных минерализованных зон. Минерализованные скважины хорошо идентифицируются по соотношению $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и по соотношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ для нескольких скважин и их хорошо отличить от 'бесплодных' буровых скважин. Важно отметить, что "перспективные" скважины, которые показывают "сильно аномальные" значения отношения Pb к изотопу, но не содержат U, могут быть идентифицированы для последующего бурения. Хотя ограниченные следы аномалий простираются не очень далеко от залежи минерализации, находящейся в фундаменте, и поэтому не подходят для определения местоположения в региональном масштабе, они указывают на местоположения потенциальной минерализации и структурные условия существующей минерализации в перспективном масштабе на основе изучения данных по изотопу Pb в отдельных буровых скважинах и оценки минерализованных зон. В более общем смысле геохимический метод Pb-isotope pathfinder, который обеспечивает протяженность и ориентацию аномальных областей, также может быть полезен для улучшения понимания того, как и когда рудные растворы перемещались для отложения U и Pb в фундаменте.

6. Выводы.

1. Две разновидности слабокислотных выщелачиваний (SRC, QFIR) предоставили данные, которые существенно не отличались. Любая разновидность WAL может быть использована при поисках урана с использованием геохимии с изотопом Pathfinder.

2. Данные о частичном расщеплении изотопов Pb для залежей U, находящихся в фундаменте, в районе Киггавик, дают результаты, которые очень похожи на результаты, полученные для данных WAL. Оба набора данных дали интересные результаты векторизации на диаграммах рассеяния, внутрискважинных графиках и в плане. В отсутствие данных по изотопам Pb по WAL, данные о частичном расщеплении изотопов Pb могут быть использованы для оценки перспективности, а также для определения вектора поисков.

3. Диаграммы с использованием соотношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ показывают систематические тенденции, полезные при поисках урана типа «несогласия». Они показывают, что рассеивание изотопов Pb произошло вокруг находящихся в подвале месторождений U в Киггавике, близко к вмещающим структурам (разломам). Эта дисперсия

образует мишень для метода поиска изотопов Pb в условиях фундамента, аналогично тому, что ранее проводилось в условиях песчаников.

4. Графики соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и U предоставляют информацию об изотопном составе Pb, который подтверждается или не подтверждается количеством U, содержащегося в породе. Эти изотопные данные используются для определения "избыточного содержания Pb", которое может отображаться на "скорректированных" скважинных графиках с $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Исходные скважинные графики $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ не предоставляют информации об "избыточном содержании Pb", но "скорректированные" скважинные графики $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ показывают эти значения изотопов, не подтвержденные содержанием U.

5. Хотя следы аномалий изотопа Pb (гало) ограничены по протяженности за пределами контура минерализации в породах фундамента, они полезны для оценки отдельных скважин и минерализованных зон. Однако отсутствие обширных аномалий, выходящих за пределы зон минерализации в фундаменте, ограничивает использование метода поисков рассеяния изотопов Pb для регионального прогнозирования.

VII. ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ДДЗ «ASTER» (рудный район Сар-Чешме, Иран) [3].

1. Введение

Во многих случаях рудные месторождения были обнаружены путем распознавания гидротермально измененных вмещающих пород. Для понимания распределения, свойств и характеристик различных типов горных пород в пределах определенной территории региональные литологические карты могут сыграть важную роль как в геологическом картографировании, так и при поисках ПИ. Получение таких литологических карт отнимает много времени, требует интенсивной работы в поле и может быть сложной задачей в случаях, когда исследуемая территория труднодоступна.

Методы картирования с помощью ДДЗ позволяют определять зоны с высоким потенциалом рудной минерализации на обширной территории путем распознавания гидротермально измененных пород. Технические характеристики мультиспектральных и гиперспектральных датчиков дистанционного зондирования имеют решающее значение для литологического картирования при поисках ПИ. Датчики, оснащенные гиперспектральной технологией, способны одновременно получать изображения со 100-200 спектральными полосами, обеспечивая уникальную комбинацию спектрально смежных изображений. Однако, помимо спектральной путаницы, трудностей в обработке данных, относительно узкой ширины полосы и атмосферных помех, гиперспектральные изображения высокого разрешения подвержены спектральным помехам. Один пиксель на изображении обеспечивает покрытие большой площади земной поверхности (например, 1000 м²), что затрудняет выбор чистых пиксельных спектров для обучающих выборок в контролируемом классификаторе; более того, в результате точность литологической классификации потенциально низка.

Благодаря доступности мультиспектральных данных высокого разрешения, таких как SPOT и GF-2, проблема низкой точности классификации была в определенной степени решена. Несмотря на впечатляющие возможности отображения структурных и текстурных особенностей, мультиспектральные спутниковые данные с высоким пространственным разрешением имеют узкий спектральный диапазон. Имеется всего несколько видимых и ближних инфракрасных диапазонов и заметное отсутствие других спектральных диапазонов, таких как коротковолновый и тепловой инфракрасный.

Усовершенствованный датчик космического радиометра теплового излучения и отражения (ASTER) может идентифицировать литологические единицы и зоны гидротермальных изменений полезных ископаемых. ASTER (Министерство экономики,

торговли и промышленности, Токио, Япония) обеспечивает покрытие по всему миру с большим временем повторения (16 дней) при относительно высоком пространственном разрешении (15-90 м). Используя эти ДДЗ, можно идентифицировать изображения, на которых нет облачного покрова или которые носят сезонный характер, чтобы минимизировать влияние растительности. Было продемонстрировано, что удаленная идентификация минералов оксида железа может быть легко достигнута с использованием видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (VNIR) ASTER. Основные характеристики поглощения Al–O–H, Mg–O–H, Si–O–H и CO₂ для идентификации минералов с гидротермальными изменениями (например, филлосиликатов, соросиликатов и карбонатов) могут быть обнаружены с помощью коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR) ASTER. Кроме того, тепловые инфракрасные диапазоны (TIR) ASTER позволяют различать литологические группы силикатов по спектрам излучательной способности, которые получены из растягивающих колебаний Si–O–Si.

Для картирования литологических единиц и выявления зон изменения минералов к данным ASTER обычно применяются несколько алгоритмов обработки изображений, а именно математика полос, минимальная доля шума, отображение спектральных углов, анализ главных компонент, композиция ложных цветов и согласованный фильтр. Результаты этих традиционных алгоритмов содержат некоторые недостатки, такие как неклассифицированные единицы измерения, которые являются сложными. Следовательно, эти методы обычно могут снизить точность литологического картирования и отображения изменений. В последнее время алгоритмы машинного обучения (ML) оказались более эффективными, чем обычные методы классификации геологических объектов. ML, являющийся поддоменом искусственного интеллекта, представляет собой метод, основанный на данных, который помогает извлекать полезную информацию и распознавать закономерности в данных с минимальным участием человека. Алгоритмы ML обладают рядом преимуществ, особенно при автоматическом решении наиболее сложных нелинейных задач, и более надежны при обработке недостающих данных, чем традиционные методы обработки изображений. Особое внимание уделяется задаче контролируемой классификации литологии для прогнозирования классов, представляющих пространственное распределение геологических объектов.

Широко применяемые алгоритмы ML в геологии и картографировании полезных ископаемых включают машины опорных векторов (SVM), искусственные нейронные сети (ANNS), случайный лес (RF), классификатор максимального правдоподобия (MLC), k-ближайших соседей (k-NN) и наивный байесовский алгоритм (NB). Усовершенствованные алгоритмы ML для обработки изображений на основе спутниковых данных значительно

помогли улучшить обнаружение литологических и структурных особенностей, а также идентифицировать зоны изменения при поисках полезных ископаемых. Литологическое картирование можно было бы сделать более выполнимым с помощью современных алгоритмов ML, таких как gradient boosting (GB), extreme gradient boosting (XGB) и искусственных нейронных сетей (ANNS).

Нейронная сеть - это алгоритм искусственного интеллекта, который способен анализировать закономерности, обучать задачам и решать проблемы, подобные человеческим. ANN широко используется для решения сложных задач в различных областях, включая задачи регрессии и классификации. Производительность ANNs зависит от нескольких ключевых параметров, таких как функции активации, функции потерь, оптимизаторы, скрытые слои, количество узлов и уровни регуляризации. GB - это метод последовательного ансамблевого обучения, при котором производительность модели улучшается с течением итераций. Этот метод создает модель поэтапно. Оно выводит модель, позволяя оптимизировать абсолютную дифференцируемую функцию потерь. Алгоритм XGB представляет собой расширенную версию алгоритма градиентного бустинга. Он разработан для повышения производительности и быстродействия модели ML. Были проанализированы алгоритмы глубокого обучения и большие данные о железной минерализации скарнового типа (контакты осадочно-магматических интрузий) в Китае. Результаты показали сильную пространственную взаимосвязь между известными областями минерализации, спрогнозированными методом глубокого обучения. Был исследован потенциал двух алгоритмов ML, включая SVM и ANN, используя оптические данные Sentinel-2 для литологического картирования в Пакистане. Общая точность - 95,78% и 95,73% для SVM и ANN соответственно. Использование методов ML алгоритмов XGB и ANN для обработки данных ASTER обладает высоким потенциалом и большими преимуществами для литологического картирования и поисков ПИ.

Основная цель данного исследования - предложить подход для выбора наиболее оптимизированного и эффективного ML для литологического картирования с использованием ДДЗ ASTER. В исследовании сравниваются несколько традиционных алгоритмов машинного обучения, таких как RF и SVM, с новыми комплексными методами машинного обучения, такими как GB, XGB и deep-learning ANN, для пространственного моделирования литологических единиц. Это исследование представляет собой комплексную оценку алгоритмов RF, SVM, GB, XGB и deep ANN для литологического картирования с использованием данных ASTER. Модели могут предоставить геологам возможности точного литологического картирования и локализации оруденения, особенно когда они применяются к аналогичным регионам.

2. Геология исследуемого района.

Большая часть территории Ирана полузасушливая, с редкой, в основном травянистой растительностью на хорошо открытых поверхностях. Это делает геологическое картирование на основе ДДЗ идеальным методом исследования. В качестве примера был выбран регион добычи меди Сар-Чешме в провинции Керман (юго-восток Ирана) (рис. 1А,В). Месторождение порфировой меди Сар-Чешме считается вторым по величине мировым месторождением этого металла, наиболее важным в Иране, и эксплуатируется с древних времен. Здесь содержится примерно 1200 миллионов тонн руды со средним содержанием 1,2% меди, 0,03% молибдена, 3,9 г/т Ag и 0,11 г/т Au. Впервые методы, основанные на ML (RF, SVM, GB, XGB и deep-learning ANN), были использованы для литологического картирования с использованием ДДЗ ASTER в районе добычи меди Сар-Чешме (рис. 1).

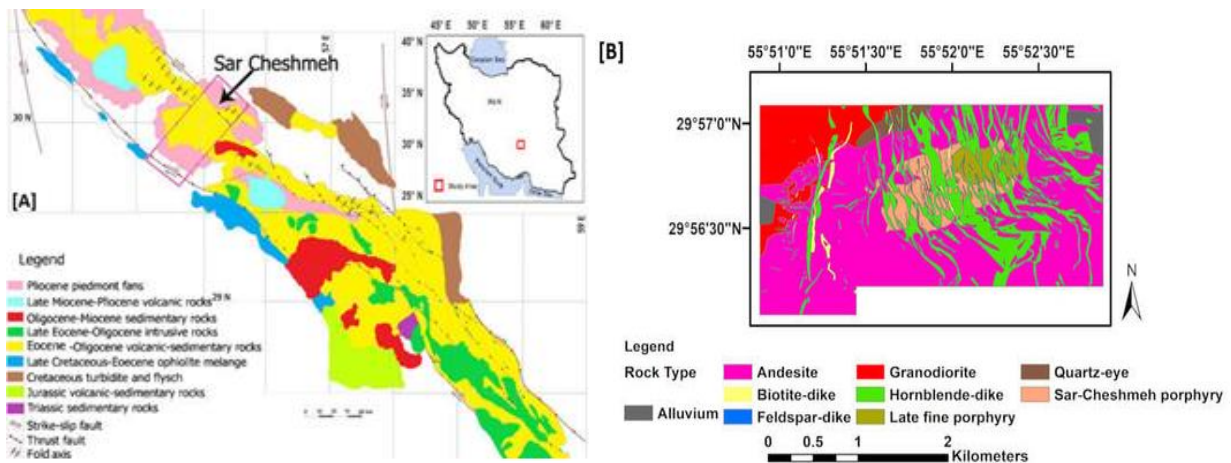


Рис. 1. (А) Расположение района Сар-Чешме в магматическом поясе Урумия-Дохтар на юге Ирана и (В) Литологическая карта месторождения меди Сар-Чешме.

Район исследования находится в 160 км к юго-востоку от города Керман и к югу от вулканического пояса Урмия-Дохтар (рис. 1А). Он расположен в районе эоценовых вулканических пород и олигоцен-миоценовых субвулканических гранитоидов.

Считается, что вмещающим медно-порфиоровое месторождение Сар-Чешме является эоценовый вулканогенный комплекс, который состоит из следующего: пироксен-трахибазальт, калиевый и шшонитовый пироксен-андезит, менее распространенный андезит, агломерат, туф и туфообразный песчаник. В период ~23 млн лет назад в эти породы были внедрены гранитоидные фазы, такие как кварцевый диорит, кварцевый монцонит и гранодиорит. Эти гранитоидные породы прорезаны порфиоровыми дайками, состоящими из роговой обманки, полевого шпата и биотита. Медно-порфиоровое оруденение связано с хорошо развитыми зонами гидротермальных филлитов, аргиллитов, пропицитов, зон окремнения и ярозитовых изменений.

3. Материалы и методы.

3.1. Характеристики минералов и предварительная обработка данных ASTER.

ASTER имеет 14 отдельных полос:

- (1) 3 полосы в видимой и ближней инфракрасной областях (VNIR) (от 0,52 до 0,86 мкм) с пространственным разрешением 15 м (полосы 1, 2 и 3),
- (2) 6 полос в коротковолновой инфракрасной области (SWIR) (от 1,60 до 2,43 мкм) с пространственным разрешением 30 м (полосы 4, 5, 6, 7, 8, и 9, и
- (3) 5 диапазонов в тепловом инфракрасном диапазоне (TIR) с пространственным разрешением 90 м (диапазоны 10, 11, 12, 13 и 14).

В этом исследовании использовались наборы данных ASTER Level 2 surface reflectance VNIR и SWIR с поправкой на перекрестные помехи (AST_07XT) и surface radiance TIR (AST_09T) (уровень 0 ASTER: исходные данные; Уровень 1A: калибровка уровня 0 и преобразование в единицы яркости; Уровень 1B: преобразование яркости в коэффициент отражения от датчика at; Уровень 2: применение атмосферной коррекции и достижение коэффициента отражения поверхности. AST_07XT включает два файла продукта, которые были скорректированы по атмосфере для VNIR и SWIR, полученных на основе данных уровня 1B. Данные AST_09T скорректированы по атмосфере и обеспечивают пространственное разрешение 90 м для тепловых полос. Ортотрансформация была применена к AST_07XT и AST_09T с помощью инструментария предварительной обработки ASTER от ENVI с использованием группы наземных контрольных точек. Используя билинейный метод, ASTER SWIR и TIR с 30 м и 90 м были пересчитаны на 15 м, чтобы соответствовать данным VNIR.

В результате вибрационных обертонов, электронных переходов, переноса заряда и проводимости многие минералы обладают диагностическими характеристиками поглощения в области спектра. Наблюдается заметная особенность поглощения Al–OH при 2,2 мкм и менее интенсивная - при 2,35 мкм, которые характерны для действительно измененных горных пород, содержащих серицит. Для каолинита и алунита характерны расширенные глинистые изменения с линиями поглощения Al–OH на 2,165 мкм и 2,2 мкм соответственно. Хлорит, эпидот и кальцит обычно присутствуют в пропилиново-измененных породах с характеристиками поглощения Fe, Mg–OH и CO₃ от 2,1 до 2,3 мкм (рис. 2А). Минералы, содержащие оксиды и гидроксиды железа, такие как лимонит и гематит, как правило, демонстрируют спектральные характеристики поглощения в диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм (рис. 2В).

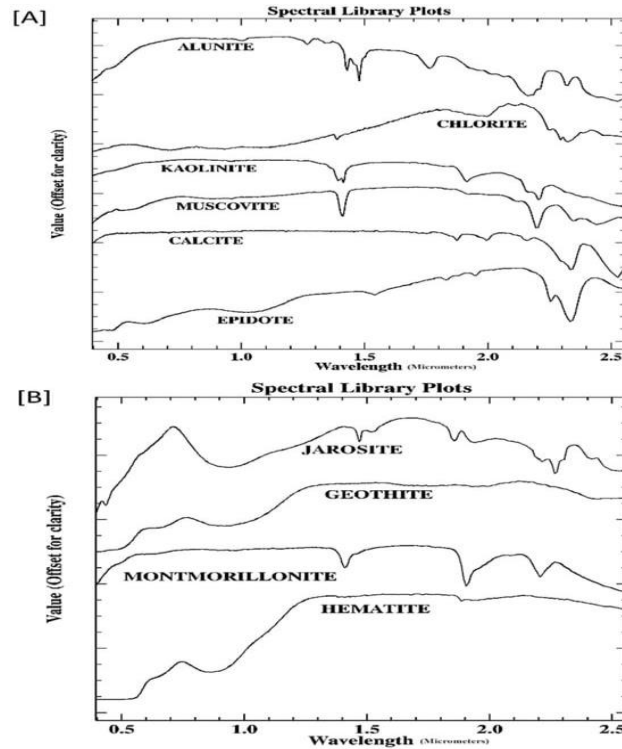


Рис. 2. (А) Лабораторные спектры эпидота, кальцита, мусковита, каолинита, хлорита и алунита. (В) Лабораторные спектры монтмориллонита, ярозита, гематита и гетита.

Используя полосы ASTER SWIR для литологии и картирования минералов было предложено несколько спектральных индексов, используя линейную комбинацию коэффициентов отражения в каждой полосе ASTER SWIR, включая индекс каолинита, индекс алунита, индекс кальцита и индекс монтмориллонита. Учитывая спектральные характеристики поглощения растительности, минералов и горных пород в различных диапазонах данных ASTER, предложен растительный индекс и несколько минералогических индексов с использованием VNIR и SWIR, а также несколько литологических индексов с использованием TIR спектров, таких как индекс стабилизированной растительности (SVI), индекс измененных минералов, содержащих OH (ONI), кварцевый индекс (QI) и карбонатный индекс (CI). Характеристики, извлеченные из полос ASTER, которые использовались в этом исследовании, обобщены в таблице 1.

Табл. 1.

Спектральные характеристики, которые использовались в этом исследовании.

Band Indices	Feature Name	Band Indices	Feature Name
$\frac{B_4}{B_5}$	Alteration	$\frac{B_6 + B_8}{B_7}$	Dolomite
$\frac{B_1 + B_6}{B_5}$	Alunite/Kaolinite/Pyrophyllite	$\frac{B_5}{B_6}$	Host Rock
$\frac{B_6}{B_8}$	Amphibole	$\frac{B_7}{B_5}$	Kaolinitic
$\frac{B_6 + B_8}{B_8}$	Amphibole/MgOH	$\frac{B_7}{B_5} * \frac{B_7}{B_8}$	Alunite Index
$\frac{B_{13}}{B_{14}}$	Carbonate	$\frac{B_7}{B_6}$	Muscovite
$\frac{B_7 + B_8}{B_8}$	Carbonate/Chlorite/Epidote	$\frac{B_{14}}{B_{12}}$	Quartz-Rich Rocks
$B_{3N} \times \frac{B_2}{B_1}$	Chlorophyll Vegetation Index (CVI)	$\frac{B_8}{B_5} \times \frac{B_8}{B_6}$	Calcite Index
$\frac{B_1}{B_2} \times \frac{B_1}{B_2}$	Stabilized Vegetation Index (SVI)	$\frac{B_{11} \times B_{11}}{B_{10} \times B_{12}}$	Quartz Index (QI)
$\frac{B_7}{B_6} \times \frac{B_7}{B_8}$	OH-bearing Altered Minerals Index	$\frac{B_{12}}{B_{13}}$	Mafic Index
$\frac{B_8}{B_6} \times \frac{B_8}{B_5}$	Kaolinite Index		

3.2. Реализация алгоритмов машинного обучения (ML).

При извлечении спектральных характеристик из полос ASTER стремились использовать их в качестве входных данных для алгоритмов ML, которые идентифицируют наиболее важные объекты, используя важность объектов случайного леса (RF) (FI) и извлекая коэффициенты корреляции Пирсона (r) среди всех исходных спектральных полос. В этом анализе были выбраны методы случайного леса (RF), машины опорных векторов (SVM), глубокого обучения ANN, градиентного бустинга (GB) и экстремального градиентного бустинга (XGB). Всего было рассмотрено 33 полосы, которые были заданы алгоритмам ML в двух сценариях. На первом этапе все объекты использовались в качестве входных данных для алгоритмов. Во втором сценарии были извлечены коэффициенты корреляции Пирсона между всеми исходными спектральными полосами, затем был вычислен FI RF. Были учтены все объекты с абсолютной корреляцией более 0,9, а менее важные были удалены. Остальные объекты (т.е. 17) использовались в качестве входных данных модели. Алгоритмы ML были реализованы с использованием открытого исходного кода Python Scikit-learn (версия 1.0) и программные пакеты Keras (версия 2.3.0).

Данные выборки были отобраны с помощью стратифицированного подразделения обучающих тестов. Для каждого класса 35% образцов использовались в качестве тестовых данных, а остальные 65% - в качестве обучающих. Настройка параметров каждого алгоритма машинного обучения проводилась с помощью перекрестной проверки поиска по сетке (GridSearchCV). GridSearchCV - это существующая функция в Scikit-learn (Python). GridSearchCV - это процесс настройки гиперпараметра модели для нахождения оптимальных значений параметров в конкретной модели. Оценка точности выполнялась в два этапа. Во-первых, все спектральные диапазоны были предоставлены в качестве входных данных модели. Во-вторых, важность случайных особенностей леса была применена ко всем спектральным диапазонам. Учитывая абсолютную корреляцию между объектами, превышающую 0,9, объект с более высокой важностью был сохранен, а объект меньшей важности был удален. Наконец, остальные объекты были предоставлены в качестве входных данных для алгоритмов ML. Блок-схема методологии, которая была применена в этом исследовании, проиллюстрирована на рисунке 3.

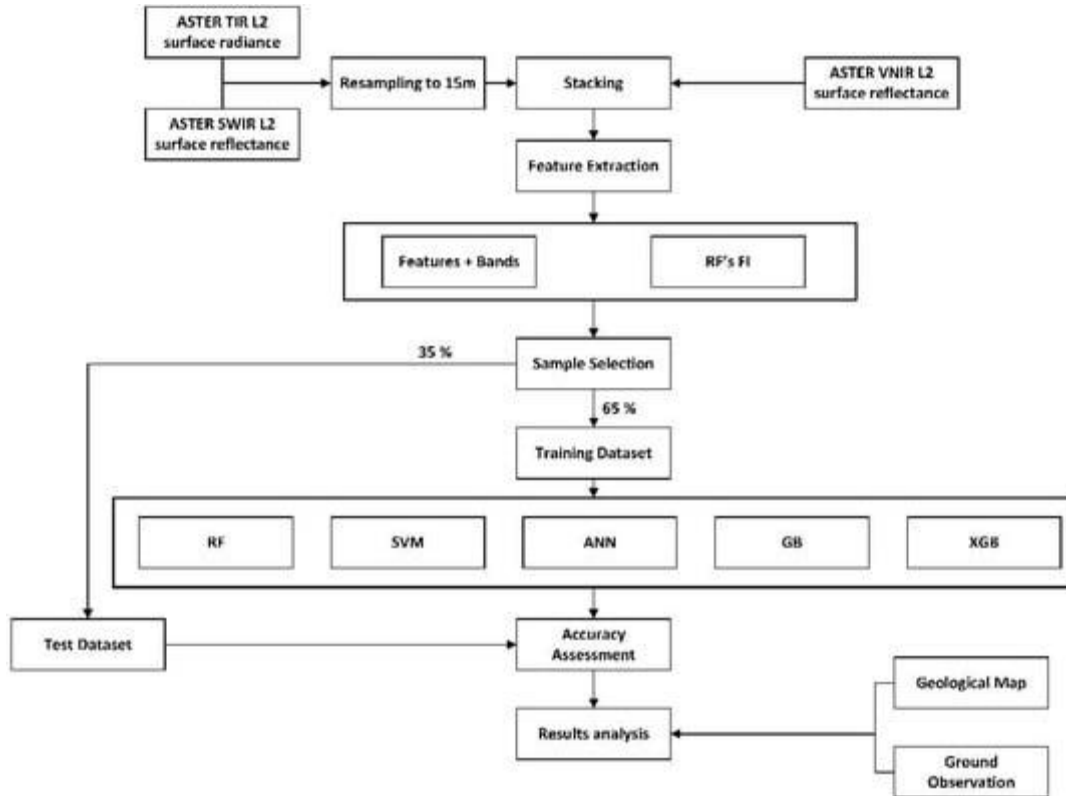


Рис. 3. Блок-схема методологии, которая была применена в этом исследовании.

Случайный лес.

Random forest представляет собой алгоритм обучения на основе дерева ансамблей и мощный непараметрический метод для решения различных задач интеллектуального анализа данных. Данные о выбросах в меньшей степени влияют на RF, чем деревья принятия решений (DTS), и они могут обрабатывать различные входные данные без переопределения набора данных. RF соответствует множеству DTS из случайно выбранного подмножества для обучения набора данных. RF состоит из множества DTS, соответствующих обучающим данным. Основная проблема метода DT заключается в том, что он имеет тенденцию близко подходить к обучающим данным; другими словами, у DT есть проблема с переобучением. RF использует средние значения для повышения точности задач регрессии и получает большинство голосов за задачи классификации. Таким образом, RF решает проблему DT по переопределению обучающих данных. Параметры, которые были выбраны для предоставления входных данных в GridSearchCV, показаны в таблице A1. Табл. A1.

Параметры GridSearch, используемые в RF-модели

Parameters	Description	Grid Search Values
n_estimators	No. of trees in the forest	5, 10, 50, 75, 100, 200, 500, 1000
max_depth	The maximum depth of the trees	2, 3, 5, 10, 15, 20, 50
min_samples_split	The minimum number of samples required to split an internal node	2, 3, 5, 8, 10, 15, 20
min_samples_leaf	The minimum number of samples required to be at a leaf node	1, 2, 3, 5, 8, 10

Машины опорных векторов.

Машины опорных векторов (SVM) представляют собой мощные контролируемые алгоритмы машинного обучения, используемые для задач классификации и регрессии. В исходной формулировке SVM-модель пытается найти гиперплоскость, которая разделяет обучающий набор данных на заранее определенное количество классов. Граница принятия решения была получена на этапах обучения, что сводит к минимуму количество ошибочных классификаций, связанных с гиперплоскостями оптимального разделения. В ходе итерационной процедуры происходит обучение поиску оптимальной границы принятия решения для разделения обучающих выборок, предположительно в многомерном пространстве. Результирующая гиперплоскость представляет собой $n-1$ подпространство в n -мерном пространстве. Обучающие выборки определяют границу принятия решения, подмножество исходных данных, называемых опорными векторами. В SVM часто используются нелинейные функции ядра для преобразования входных данных в многомерное пространство что делает их более разделяемыми. Радиальная базисная функция (RBF) является отличным выбором для преобразования входных данных перед реализацией нелинейных моделей. Подробные параметры поиска по сетке приведены в таблице A2.

Табл. A2.

Набор параметров GridSearchCV для SVM

Parameters	Description	Grid Search Values
Kernel	Specifies the kernel type to be used in the algorithm	'linear', 'rbf'
Gamma	Kernel coefficient for 'rbf', 'poly' and 'sigmoid'	0.001, 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3
C	Penalty parameter	1, 3, 5, 10, 20, 50, 100, 500

ANN с глубоким обучением.

Методы ANN пытаются моделировать проблемы с использованием взаимосвязанных искусственных нейронов, подобных человеческому мозгу, для решения задач машинного обучения. ANN - это многослойный персептрон с прямой связью, состоящий из одного входного, скрытого и выходного слоев. В нейронных сетях нейроны слоя могут быть подключены к нейронам всех других слоев, но не к другим нейронам внутри того же слоя. В полностью подключенном ANN каждый нейрон связан со всеми нейронами предыдущего и следующего слоев. Каждое соединение между ними имеет свой вес.

Две основные характеристики каждой ANN - это ее архитектура и способ, которым она обучается. Основной проблемой при определении архитектуры ANN является выбор соответствующего количества скрытых слоев и количества нейронов. Несколько методов

предлагают, как можно выбрать количество этих скрытых слоев и нейронов. В этом исследовании определили количество нейронов, используя уравнение (1):

$$N_n = \sqrt{(m+2)N} + 2\sqrt{\frac{N}{m+2}} \quad (1)$$

Где N_n - количество нейронов в каждом слое, N - количество входных нейронов и m - количество слоев. Изучили различные функции активации для модели deep ANN, включая ReLU (выпрямленную линейную единицу), сигмоидальную, Tanh (гиперболическую касательную функцию) и линейную. Ранняя остановка использовалась, чтобы избежать переобучения в модели deep ANN. Поэтому 20% обучающих данных были выбраны в качестве проверочных, которые использовались в процессе обучения.

Повышение градиента.

Дерево решений с градиентным повышением (GB) - это вариант ансамблевого обучения, где генерируется несколько слабых прогностических моделей, затем объединяются и взвешиваются в функции, аппроксимирующей или прогнозирующей выходную переменную по ансамблю входных переменных. Повышение и пакетирование - два распространенных типа коллективного обучения. "Повышение" определяется как процесс преобразования группы из нескольких слабых учащихся в несколько сильных, тем самым уменьшая смещение модели. "Пакетирование" относится к начальной агрегации, процессу, посредством которого уменьшается дисперсия набора данных, одновременно избегая переобучения окончательной модели ML. Уменьшение дисперсии достигается путем генерации множества деревьев решений из независимых подмножеств, случайным образом выбранных из данных. GB используется в задачах классификации и регрессии таким же образом, как RF. GB обычно включает в себя три этапа: (1) установление функции потерь, которая должна быть оптимизирована; (2) генерация слабых учащихся (обычно деревьев решений) для составления прогноза; и (3) создание аддитивной модели для включения слабых учащихся таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь. GB обучает множество моделей последовательным и аддитивным способом.

XGB был создан для реализации GB, который представляет собой очень впечатляющий и гибкий алгоритм. Программное обеспечение XGB (на Python версии Scikit-learn 1.0), совместимое с различными платформами (C++, Python, R). XGB работает быстрее по сравнению с другими реализациями GB. Подробные сведения о параметрах, которые были выбраны для GridSearchCV, приведены в таблице A3.

Параметры GridSearch для алгоритмов GB и XGB.

Parameters	Description	Grid Search Values
learning_rate	Shrinks the contribution of each tree	0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5, 1
n_estimators	The number of boosting stages to conduct	10, 25, 50, 70, 100, 200, 500, 1000, 2000
max_depth	Limits the number of nodes in the tree	2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25
max_features	The number of features to consider when searching for the best split	'auto', 'sqrt', 'log2'

Оценка точности.

Матрица путаницы (табл.4) широко используется для классификации для оценки производительности алгоритма. Матрица путаницы регулярно сообщает о количестве истинно положительных результатов (TP), истинно негативных результатов (TN), ложноположительных результатов (FP) и ложноотрицательных результатов (FN)

Пример матрицы путаницы.

	True Condition		
	Total Population	Condition Positive	Condition Negative
Predicted Condition	Predicted Condition Positive	True Positive	False Positive
	Predicted Condition Negative	False Negative	True Negative

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\text{Precision} = \frac{FP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$F1 - \text{score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (4)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (5)$$

Здесь TP представляет количество пикселей, в которых как наземные данные, так и алгоритм машинного обучения указывают одну и ту же метку для тестовых данных. FP - это объект, у которого истинная метка была отрицательной, но алгоритм неверно предсказал ее как положительную. FN - это объекты, у которых истинная метка была положительной, но алгоритм неверно предсказал ее как отрицательную. Наконец, переменная TN - это элементы, у которых истинная метка и прогнозируемая метка правильно совпадают как отрицательные. На основе этих определений были выбраны три критерия для оценки каждого класса (уравнения (2)– (4)). Кроме того, был выбран один критерий для оценки общей точности каждого метода (уравнение (5)), который вычисляется путем деления суммы выборов правильной классификации на общее количество выборов.

4. Анализ и результаты.

4.1. Извлечение объектов из ASTER.

Необходимо оценить прогностическую способность литологических объектов для получения более точного моделирования чувствительности карты, поскольку некоторые особенности могут оказывать негативное влияние на созданные модели ML. Более того, существующая сильная корреляция между этими объектами также снизит производительность моделей. На рисунке 4А, В показаны корреляции между выбранными объектами. Как видно на рисунке 4А, внутригрупповая корреляция между полосами VNIR высока (0,92–0,97). Корреляция между полосами SWIR и TIR также высока (SWIR: 0,84–0,98; TIR: 0,98–1,00). Внутригрупповые корреляции для диапазонов VNIR, SWIR и TIR показаны соответственно в виде блоков 3×3, 6×6 и 5×5 по диагонали корреляционной матрицы (рис. 4А); межгрупповые корреляции представляют собой большие недиагональные группы оценок. Блоки межгрупповых корреляций, особенно между TIR (полосы 10-14) по сравнению с полосами NVIR и SWIR, были в основном слабыми и отрицательными (от -0,38 до -0,52).

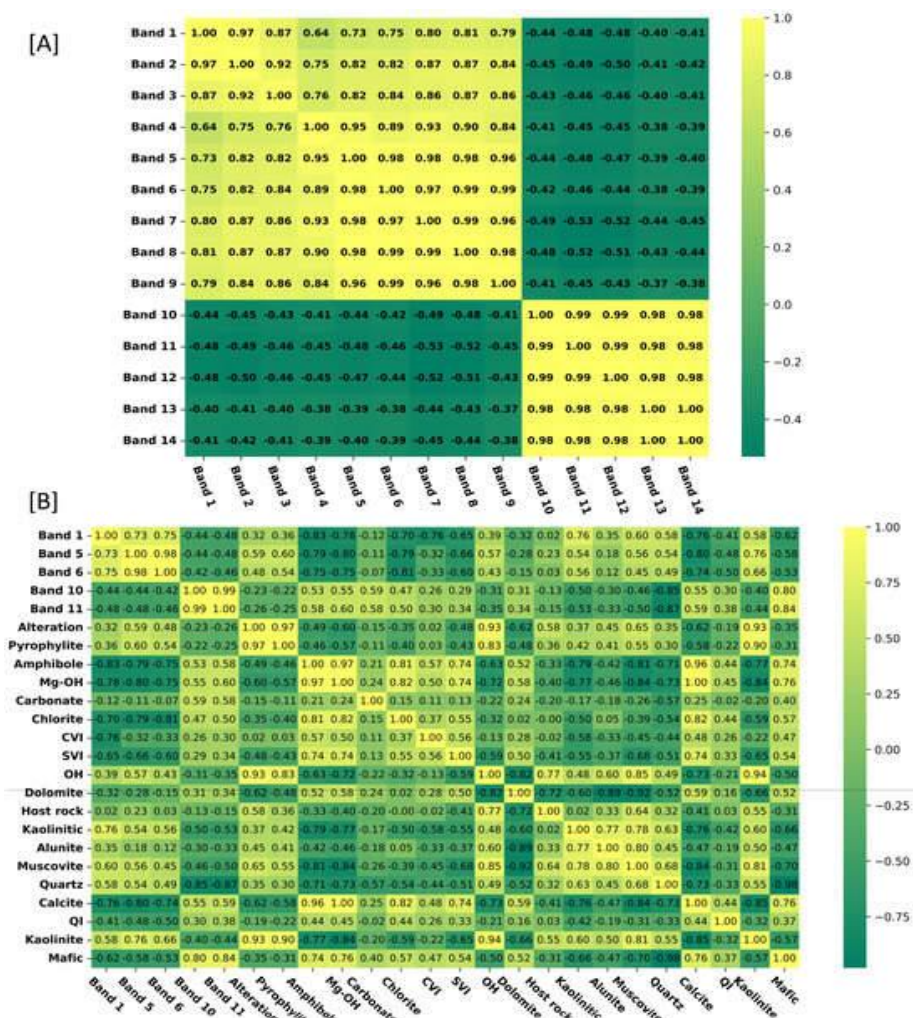


Рис. 4. (А) Корреляционная матрица Пирсона между полосами ASTER VNIR, SWIR и TIR; (В) Корреляции Пирсона между объектами и полосами.

Поскольку количество объектов было сравнительно большим, а результирующая визуализация корреляций между объектами была нечеткой, переставили переменные, чтобы подчеркнуть наиболее сильные группировки, как показано на рисунке 4В. Следует отметить, что, поскольку корреляции между полосами VNIR и SWIR были особенно высокими, мы выбрали четыре полосы из групп как репрезентативные для исходных полос VNIR (полоса 1), SWIR (полосы 5 и 6) и TIR (полосы 10 и 11) среди индексов, которые представлены на рисунке 4В.

На рисунке 5 показаны значения FI (важности объекта), ранжированные от наименее важных (<0,02: хлорит, полоса 3 ASTER) до наиболее важных (близко к 0,06: матовый, кварц). ASTER Band 10 (TIR) - третья по важности функция. Многие из оставшихся полос сгруппированы в центре этого рейтинга (FI = 0,03), а именно полосы 4, 7, 8 и 9 в SWIR (коротковолновом инфракрасном диапазоне) и полосы 13 и 14 в TIR (тепловом инфракрасном диапазоне).

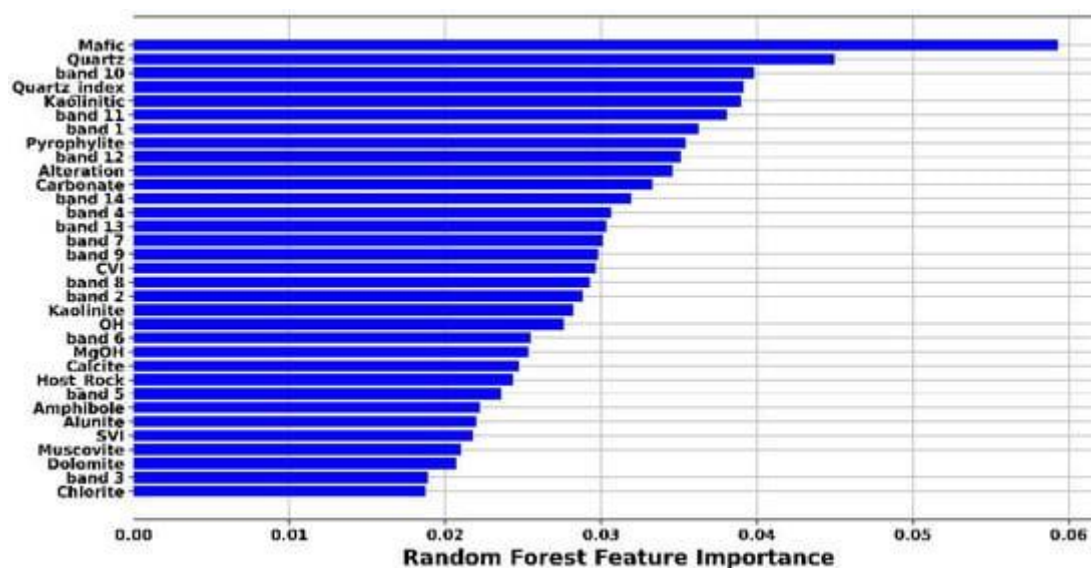


Рис. 5. Значения радиочастотных объектов и их ранжирование.

Первые и вторые по важности признаки случайного леса (рис. 5) показаны на рисунке 6А, В. Классы порфиров Сар-Чешме имеют низкие значения основного индекса, в то время как гранодиорит и андезит имеют относительно высокие значения основного индекса. Что касается кварцевого индекса, то гранодиорит и андезит имеют сравнительно высокие значения кварцевого индекса. К данным были применены два типичных алгоритма преобразования изображений, включая анализ основных компонентов (РСА) и анализ независимых компонентов (ИСА), и проведено сравнение с двумя наиболее важными характеристиками (матовый и кварцевый). Помимо улучшения изображений, эти методы уменьшают спектральную избыточность изображения. С помощью РСА исходные, часто взаимосвязанные

переменные в многомерном наборе данных высокой размерности были сведены к меньшему числу более легко интерпретируемых ортогональных (некоррелированных) составных переменных или компонентов.

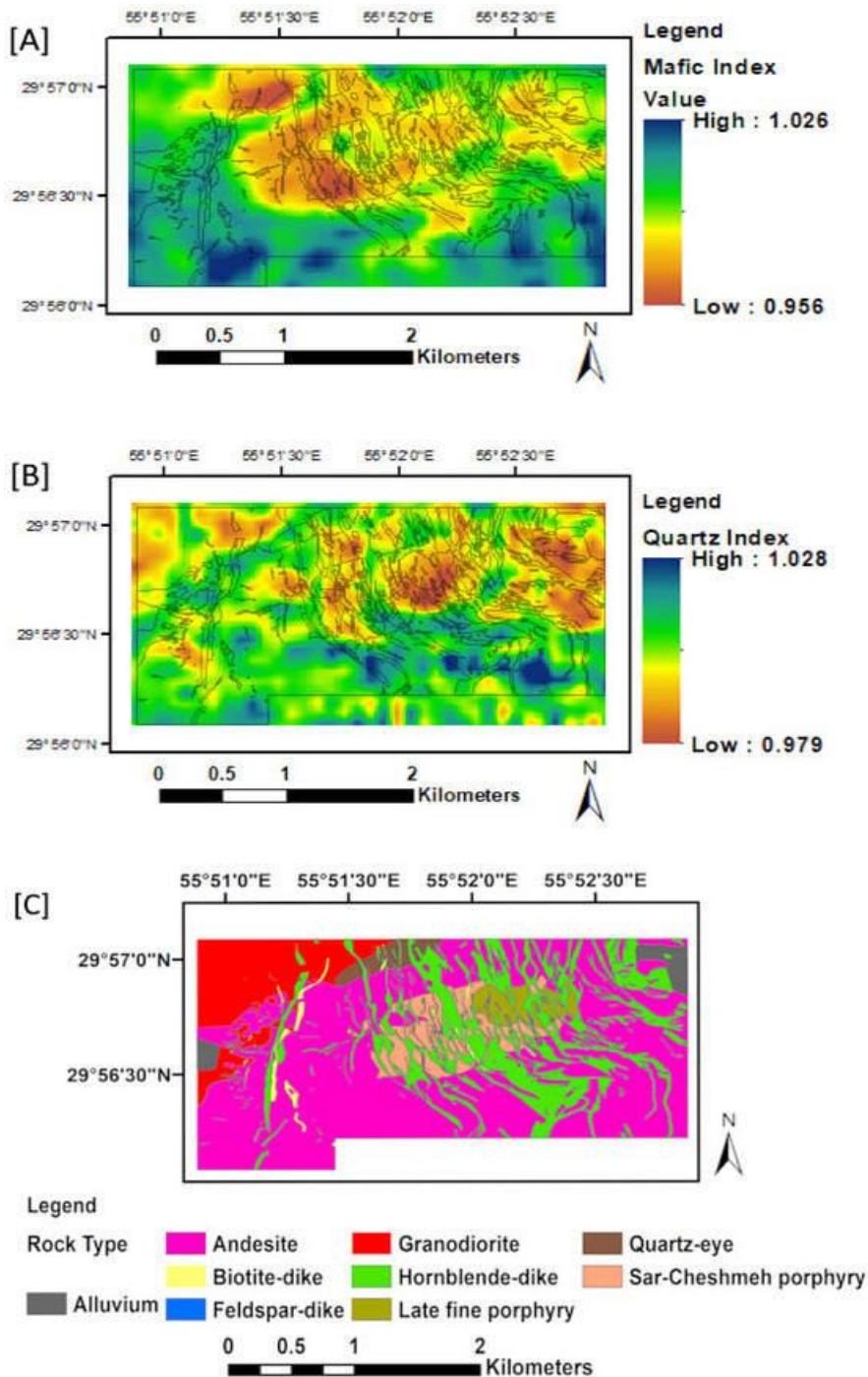


Рис. 6. Матовый индекс (А) и кварцевый индекс (В) были извлечены из полос ASTER;
(С) Литологическая карта месторождения меди Сар-Чешме.

Предполагается, что только один подкомпонент среди смеси подкомпонентов, составляющих сигнал, является гауссовым: статистика более высокого порядка для разделения сигналов и выделения объектов. Расчет ICA по умолчанию дает ряд компонентов, количество которых может (должно) быть равно количеству исходных переменных. Относительную

важность этих компонентов трудно определить, учитывая, что у них нет ранжирования. Тем не менее, по сравнению с PCA, ICA может предоставлять больше спектральной информации, что может улучшить литологическую дифференциацию в геологическом контексте дистанционного зондирования. Состав RGB-изображений PCA и ICA представлен на рисунке 7А, В соответственно. Красный, зеленый и синий обозначают соответственно PC1, PC2 и PC6 (рис. 7А). Согласно анализу, PC1, PC6 и PC2 имеют самую высокую радиочастотную чувствительность соответственно. На рисунке 7В IC1 - это R, IC2 - это G, а IC4 - это B. Хотя PCA не различает литоконтакты на границах литоконтактов, ICA работает хорошо. Представленные результаты рисунок 7 предполагают, что зоны биотита и андезита можно лучше контрастировать, используя комбинации полос, которые были получены с использованием преобразований ICA и PCA.

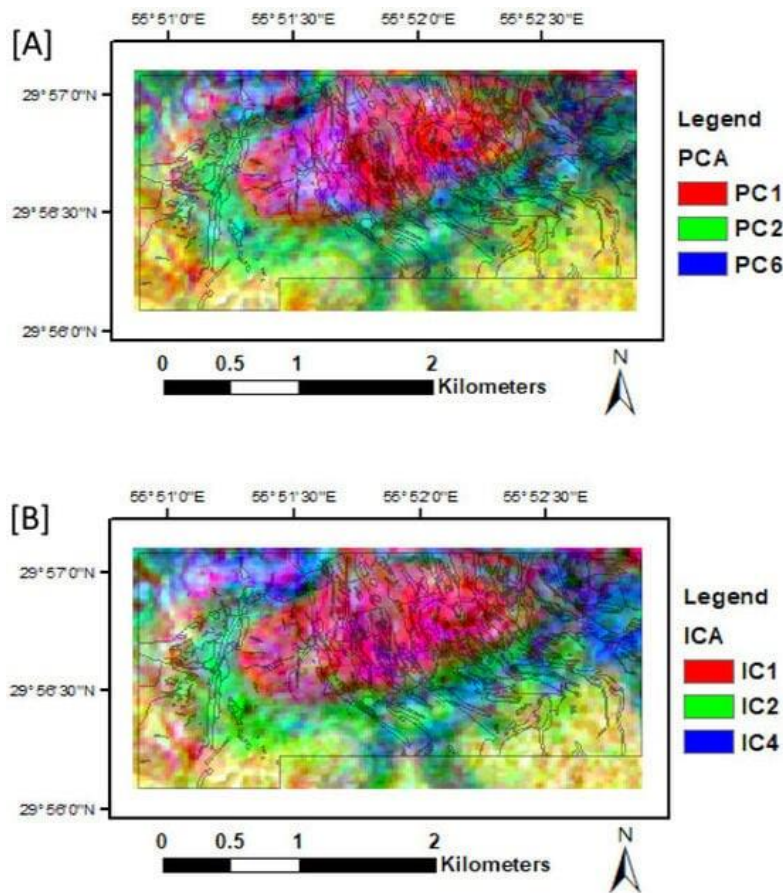


Рис. 7. (А) Комбинации RGB из PCA: R, PC1; G, PC2; B, PC6.
(В) Комбинации RGB для ICA: R, IC1; G, IC2; B, IC4.

4.2. Обучающая выборка.

7338 образцов, представляющих девять типов литологии, были определены в качестве зон тестирования. Зона тестирования охватывала около 35% всех образцов. Кроме того, достоверность и точность обучающих выборок были оценены и подтверждены полевыми наблюдениями и анализом шлифов. Количество тестовых выборок для каждого класса

включено в таблицу 2. Область обучения была ознакомлена с классификаторами RF, SVM, GB, XGB и deep-learning ANN. Сценарии, упомянутые в таблице, представляют собой только полосы (сценарий 1 или S1) и полосы плюс другие объекты (сценарий 2 или S2).

Табл. 2.

Результаты оценок точности для района тестирования.

1-й сценарий: с использованием всех полос и объектов,
2-й сценарий: с применением выбора объектов.

Test Samples (n)	Key Parameters	Accuracy Criteria	RF		SVM		GB		XGB		ANN	
			1st Scenario	2nd Scenario	1st Scenario	2nd Scenario	1st Scenario	2nd Scenario	1st Scenario	2nd Scenario	1st Scenario	2nd Scenario
131	Alluvium	precision	0.96	0.98	0.91	0.95	0.92	0.96	0.95	0.93	0.91	0.90
		recall	0.92	0.86	0.94	0.94	0.85	0.78	0.92	0.80	0.95	0.83
		F1-score	0.94	0.92	0.92	0.94	0.89	0.86	0.94	0.86	0.93	0.87
4073	Andesite	precision	0.86	0.85	0.90	0.89	0.83	0.83	0.84	0.83	0.85	0.88
		recall	0.94	0.95	0.91	0.92	0.93	0.92	0.93	0.92	0.93	0.87
		F1-score	0.90	0.90	0.91	0.90	0.87	0.87	0.88	0.87	0.89	0.88
87	Biotite Dike	precision	0.70	0.79	0.53	0.53	0.46	0.47	0.69	0.54	0.2	0.37
		recall	0.16	0.17	0.41	0.36	0.18	0.16	0.21	0.15	0.01	0.11
		F1-score	0.26	0.28	0.46	0.43	0.26	0.24	0.32	0.23	0.02	0.18
13	Feldspar Dike	precision	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		recall	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		F1-score	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
819	Granodiorite	precision	0.93	0.93	0.95	0.94	0.91	0.90	0.91	0.91	0.92	0.91
		recall	0.94	0.92	0.95	0.96	0.90	0.89	0.93	0.91	0.94	0.92
		F1-score	0.93	0.93	0.95	0.95	0.90	0.89	0.92	0.91	0.93	0.92
1514	Hornblende Dike	precision	0.73	0.72	0.70	0.70	0.66	0.63	0.68	0.64	0.70	0.61
		recall	0.57	0.56	0.68	0.64	0.52	0.52	0.54	0.50	0.49	0.60
		F1-score	0.64	0.63	0.69	0.67	0.58	0.57	0.60	0.56	0.58	0.61
189	Late Fine Porphyry	precision	0.78	0.78	0.81	0.79	0.74	0.79	0.74	0.71	0.69	0.65
		recall	0.76	0.75	0.78	0.76	0.66	0.66	0.71	0.60	0.83	0.74
		F1-score	0.77	0.77	0.80	0.78	0.70	0.72	0.73	0.65	0.75	0.69
111	Quartz Eye	precision	0.85	0.91	0.83	0.83	0.84	0.82	0.90	0.85	0.81	0.79
		recall	0.75	0.73	0.90	0.91	0.53	0.58	0.70	0.75	0.84	0.75
		F1-score	0.79	0.81	0.86	0.87	0.65	0.68	0.79	0.79	0.82	0.77
401	Sar-Cheshmeh Porphyry	precision	0.73	0.72	0.72	0.70	0.69	0.66	0.72	0.68	0.61	0.55
		recall	0.72	0.70	0.72	0.73	0.66	0.60	0.68	0.67	0.75	0.76
		F1-score	0.73	0.71	0.72	0.72	0.67	0.63	0.70	0.68	0.67	0.64
Total		accuracy	0.84	0.83	0.85	0.84	0.80	0.79	0.82	0.80	0.82	0.80

4.3. Классификация типов горных пород и анализ точности.

Результаты литологической классификации для района Сар-Чешме с использованием алгоритмов ML и изображений ASTER показаны на рисунке 8. Алгоритмы SVM и ANN (рис. 8С, F), показывают лучшее качественное соответствие каждому классу литологии по сравнению с другими алгоритмами ML.

Пять моделей и два связанных с ними сценария демонстрировали схожую общую точность (табл. 2), варьирующуюся от высокой 0,85 (SVM-S1) до низкой 0,79 (ГБ-С2), со средним значением (\pm SD) $0,82 \pm 0,02$. Сценарий 1 отличается от сценария 2 тем, что первый включает только набор ДДЗ, в то время как второй добавляет функции. Все алгоритмы ML предсказывают окварцевание с приемлемой точностью, особенно RF и XGB. Общая точность литологической классификации с использованием полос и особенностей составила 0,84, 0,85, 0,80, 0,82 и 0,82 для RF, SVM, GB, XGB и ANN с глубоким обучением соответственно. Общая точность классификации с использованием FI applied RF в процентах составила 0,83, 0,84, 0,79,

0,80 и 0,80 для RF, SVM, GB, XGB и ANN глубокого обучения соответственно (табл. 2). Результаты показали, что точность классификации с использованием RF F1 несколько ниже, чем при использовании всех объектов. Разница между двумя отдельными входными наборами данных во всех алгоритмах составляет менее 2%. В целом, RF и SVM почти во всех классах имели наивысшие показатели точности, отзывчивости и оценки F1 при использовании первого или второго сценария.

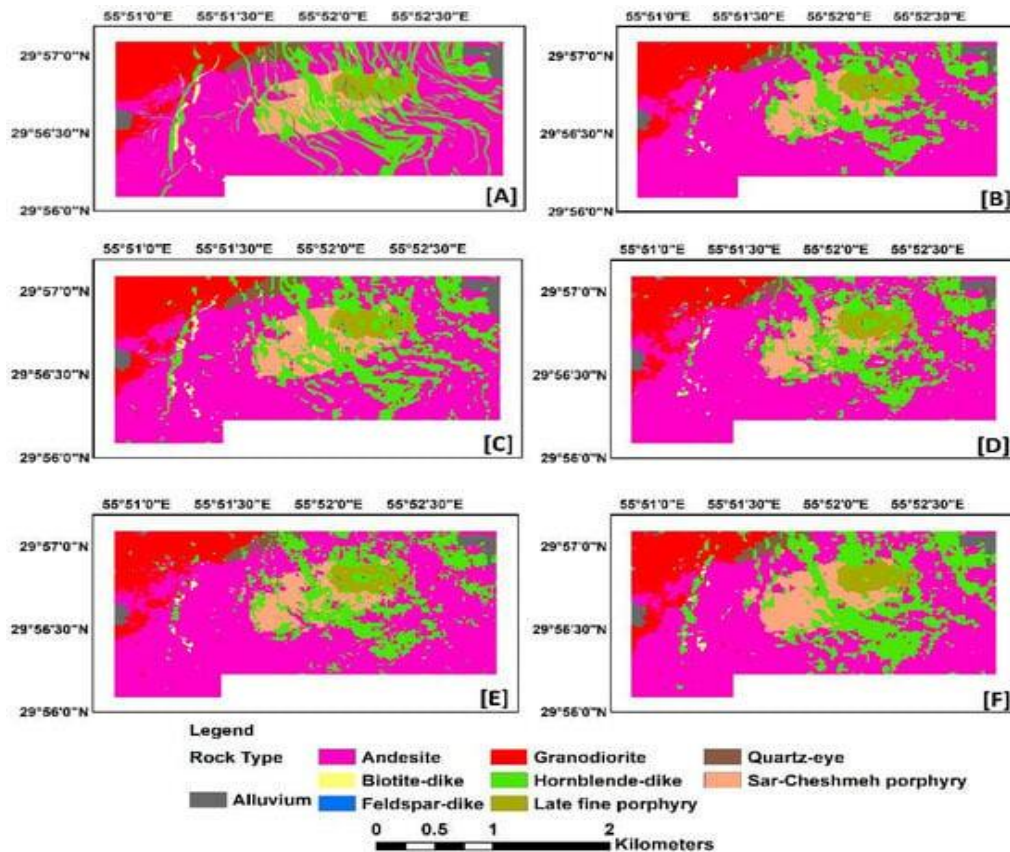


Рис. 8. Геологические карты района добычи меди Сар-Чешме (А), включая результаты литологической классификации, которые были получены из (В) RF, (С) SVM, (D) GB, (E) XGB и (F) ANN с глубоким обучением.

Среди девяти классов прогнозирование аллювия с использованием RF-модели с RF's F1 в качестве входных данных демонстрирует наибольшую точность (Сценарий 2: 0,98), несмотря на размер выборки 131. Кроме того, использование RF-модели и выполнение RF-F1 наиболее эффективно при правильном прогнозировании аллювия по сравнению с другими моделями и их соответствующими сценариями (табл. 2). Наихудшую точность оценок демонстрирует биотитовая дайка (сценарий 1: 0,20) для прогнозов, сделанных с помощью ANN (табл. 2, $n = 87$). Два вышеупомянутых класса минералов имеют небольшие размеры выборки, что может объяснять их соответствующие характеристики, но, по крайней мере, их можно оценить с точки зрения точности, повторяемости и баллов F1. Полевощпатовая дайка показала абсолютно худшие показатели в том смысле, что эти показатели не могли быть получены, учитывая размер

выборки ($n = 13$). Таким образом, изменение размера выборки может быть решающим фактором.

При учете факторного размера выборки (n) и, несмотря на высокие средние корреляции между показателями, отдельные измерения точности и повторяемости могут быть более информативными, чем точность при определении производительности моделей и связанных с ними сценариев. Действительно, картирование аллювия, гранодиорита и андезита показало наилучшую точность в соответствии с их ранжированием (точность $> 0,9$ почти для всех алгоритмов (табл. 2). Гранодиорит и андезит также показали наибольшее сходство (тест Фридмана: $p < 0,0001$), в то время как гранодиорит имел самый высокий общий средний рейтинг по F1-баллам (тест Фридмана: $p < 0,0001$). Полевошпатовая дайка неизменно демонстрировала самые низкие показатели во всех модельных сценариях по всем трем показателям.

С точки зрения согласованности оценок точности в пределах классов (исключая дайку полевого шпата), ранжирование среди модельных сценариев (10 категорий) было значительным, но умеренно согласованным (W Кендалла = $0,736$, $p < 0,0001$). Действительно, точность модели (средние ранги) можно упорядочить по классам следующим образом: RF-S2 = RF-S1 > SVM-S1 = SVM-S2 > XGB-S1 > XGB-S2 = GB-S1 = GB-S2 > ANN-S1 > ANN-S2. Другими словами, RF (Сценарий 2) показал наилучшие результаты, в то время как ANN (сценарий 2) показал худшие результаты с точки зрения общей точности модели; за исключением RF, сценарий 1 показал наилучшие результаты других моделей. Ранжирование оценок отзыва одинаковым образом (в пределах классов полезных ископаемых в разных моделях) приводит к другому и гораздо менее согласованному ($W = 0,590$, $p < 0,0001$) порядку сценариев модели: SVM-S2 = SVM-S1 > ANN-S1 = RF-S1 > RF-S2 = XGB-S1 > ANN-S2 > GB-S1 > XGB-S2 = GB-S2. Что касается оценок F1, то порядок средних рангов практически полностью совпадает ($W = 0,969$, $p < 0,0001$) среди классов полезных ископаемых. Оценки F1 в модельных сценариях снизились при высоком значении SVM-S > RF-S1 = RF-S2 > XGB-S1 = ANN-S1 > ANN-S2 = GB-S1 = XGB-S2 = GB-S2; опять же, лучшие показатели были отмечены для сценария 1.

Рисунок 8 суммирует результаты алгоритмов ML без учета RF F1. Эта карта показала, что SVM был лучше обучен, чем другие алгоритмы ML.

На рисунке 9 показаны критерии оценки тестируемых образцов с использованием SVM и всех диапазонов и особенностей в качестве входных данных.

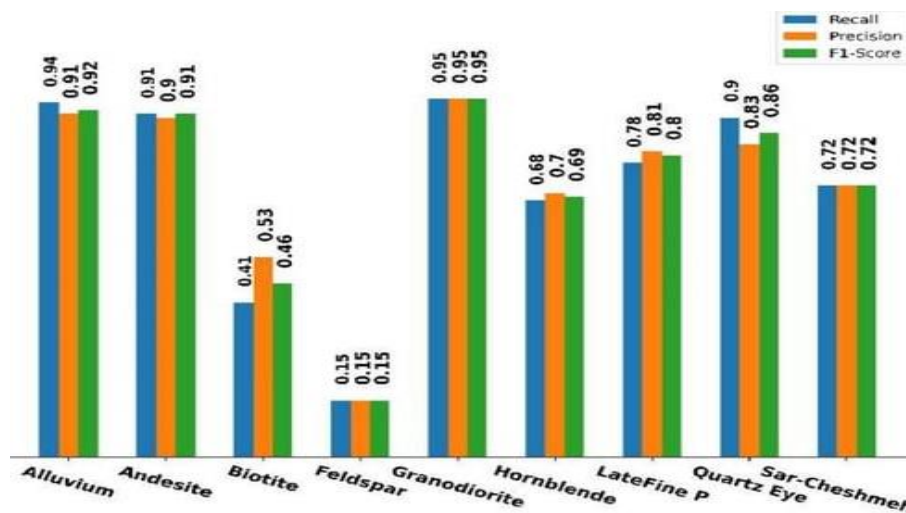


Рис. 9. Результаты классификации с использованием SVM для всех полос и объектов.

4.4. Оценка спектральных областей как входных данных для алгоритмов ML.

Результаты использования определенных спектральных областей в качестве входных данных для RF и SVM можно увидеть в таблицах 3 и 4 соответственно. Как очевидно, диапазоны ASTER VNIR показали низкую способность картирования литологических единиц в RF. ASTER SWIR и TIR показали большой потенциал для картирования литологических единиц, отличных от диапазонов VNIR. Общая точность полос TIR от ASTER выше, чем у полос SWIR от ASTER с использованием RF (табл. 3). Индивидуальные показатели производительности для модели RF демонстрируют возрастающее соответствие по диапазонам на основе их соответствующих рейтингов в каждом классе ПИ, равное 0,799 для точности, 0,827 для повторяемости и 0,901 для оценок F1. В соответствии с ожиданиями, показатели по классам полезных ископаемых также различались в каждом диапазоне. Точность была самой высокой в гранодиоритах и самой низкой в дайках роговой обманки, несмотря на низкую степень согласованности, демонстрируемую этим показателем. Повторяемость была самой высокой для андезита и самой низкой для биотитовой дайки, причем очень последовательно по полосам. Аналогичная степень согласованности по полосам была продемонстрирована по показателям F1.

Результаты SVM показали схожую точность для трех различных спектральных областей ASTER, хотя TIR была примерно на 5% ниже оценок VNIR и SWIR (табл. 4). Несмотря на одинаковую точность (0,61), VNIR (0,61) был оценен как немного лучший, чем SWIR, а также TIR (0,59). Для более объективного определения точности каждый из трех показателей эффективности был ранжирован по трем диапазонам и по девяти отдельным классам объектов.

Эффективность диапазонов VNIR, SWIR и TIR (жирный шрифт) девяти классов RF (3) и SVM (4).

	ASTER VNIR Bands			ASTER SWIR Bands			ASTER TIR Bands		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
Alluvium	0.17	0.04	0.06	0.72	0.39	0.50	0.78	0.45	0.57
Andesite	0.62	0.84	0.72	0.73	0.91	0.81	0.75	0.90	0.82
Biotite Dike	0.00	0.00	0.00	1.00	0.02	0.04	0.45	0.11	0.18
Feldspar Dike	0.00	0.00	0.00	1.00	0.08	0.14	1.00	0.15	0.27
Granodiorite	0.55	0.44	0.49	0.82	0.71	0.76	0.76	0.53	0.62
Hornblende Dike	0.25	0.15	0.19	0.50	0.33	0.40	0.52	0.42	0.46
Late Fine Porphyry	0.06	0.02	0.02	0.55	0.26	0.36	0.64	0.57	0.60
Quartz Eye	0.33	0.04	0.07	0.68	0.12	0.20	0.72	0.30	0.42
Sar-Cheshmeh Porphyry	0.17	0.07	0.10	0.55	0.48	0.51	0.60	0.57	0.59
accuracy		0.55			0.70			0.70	

	ASTER VNIR Bands			ASTER SWIR Bands			ASTER TIR Bands		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
Alluvium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Andesite	0.59	0.99	0.74	0.60	0.99	0.75	0.59	0.98	0.74
Biotite Dike	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Feldspar Dike	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Granodiorite	0.88	0.45	0.59	0.83	0.46	0.60	0.65	0.13	0.22
Hornblende Dike	0.70	0.03	0.05	0.56	0.02	0.04	0.30	0.02	0.05
Late Fine Porphyry	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.21	0.32
Quartz Eye	0.57	0.11	0.18	0.67	0.05	0.10	0.88	0.06	0.12
Sar-Cheshmeh Porphyry	0.48	0.04	0.07	0.41	0.13	0.20	0.50	0.25	0.34
Accuracy		0.61			0.61			0.59	

Среднюю точность ранжирования, повторяемость и баллы F1 не удалось выделить среди ответов VNIR, SWIR и TIR ($p \geq 0,823$). Учитывая нулевые показатели эффективности в SVM, определили, остались ли значительные различия между полосами необнаруженными после удаления андезита вместе с классами даек биотита и полевого шпата. Повторный анализ оставшихся ранжированных средних показателей не выявил каких-либо существенных различий в полосах.

4.5. Влияние количества обучающих выборок в ML на общую точность.

Количество выборок обучающих данных важно для определения точности классификации. Крайне важно получить оптимальные результаты классификации, используя соответствующее количество обучающих выборок. В большинстве случаев алгоритмам ML требуется соответствующее количество обучающих выборок. Когда количество обучающих наборов данных сокращается, стоит учитывать производительность различных алгоритмов ML. В этом анализе изучалось влияние количества тестовых образцов (обучающих и тестовых наборов данных) на точность, отзыв, оценку F1 и общую точность при тестировании, включая 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, и 40% набора данных в качестве примера производительности алгоритма ML (табл. 5).

Влияние увеличения размера тестовой выборки на точность в RF.

	15%			20%			25%		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
Alluvium	1.000	0.946	0.972	0.986	0.973	0.980	0.989	0.947	0.967
Andesite	0.864	0.952	0.906	0.872	0.950	0.909	0.872	0.948	0.908
Biotite Dike	0.667	0.108	0.186	0.667	0.160	0.258	0.611	0.177	0.275
Feldspar Dike	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Granodiorite	0.935	0.940	0.937	0.921	0.947	0.934	0.927	0.951	0.939
Hornblende Dike	0.751	0.610	0.673	0.753	0.607	0.672	0.749	0.608	0.671
Late Fine Porphyry	0.800	0.790	0.795	0.796	0.796	0.796	0.797	0.785	0.791
Quartz Eye	0.884	0.792	0.835	0.873	0.762	0.814	0.882	0.759	0.816
Sar-Cheshmeh Porphyry	0.767	0.709	0.737	0.751	0.751	0.751	0.729	0.745	0.737
Accuracy	0.849			0.851			0.849		
	30%			35%			40%		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
Alluvium	0.946	0.946	0.946	0.938	0.931	0.935	0.965	0.913	0.938
Andesite	0.864	0.948	0.904	0.855	0.949	0.900	0.855	0.950	0.900
Biotite Dike	0.682	0.200	0.309	0.722	0.149	0.248	0.727	0.162	0.264
Feldspar Dike	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Granodiorite	0.931	0.936	0.933	0.927	0.930	0.929	0.923	0.926	0.925
Hornblende Dike	0.737	0.586	0.653	0.732	0.572	0.642	0.739	0.576	0.647
Late Fine Porphyry	0.778	0.759	0.769	0.788	0.746	0.766	0.749	0.759	0.754
Quartz Eye	0.902	0.779	0.836	0.844	0.730	0.783	0.870	0.740	0.800
Sar-Cheshmeh Porphyry	0.744	0.753	0.749	0.733	0.718	0.725	0.745	0.707	0.726
Accuracy	0.843			0.836			0.837		

Общая точность RF и SVM для различных размеров тестовых выборок была рассчитана как для тестовых, так и для обучающих наборов данных (рис. 10А,В). В целом, при увеличении размера тестируемой выборки произошло небольшое общее снижение точности тестирования на 1,5% (с 84,9% до 83,7%). Общая точность для всех обучающих моделей RF показывает максимальное значение 1 (рис. 10А), что означает, что все прогнозы моделей и исходные классы литологии одинаковы. Таким образом, модель достигла достаточно хорошего (хотя и не наилучшего возможного) понимания обучающего набора данных.

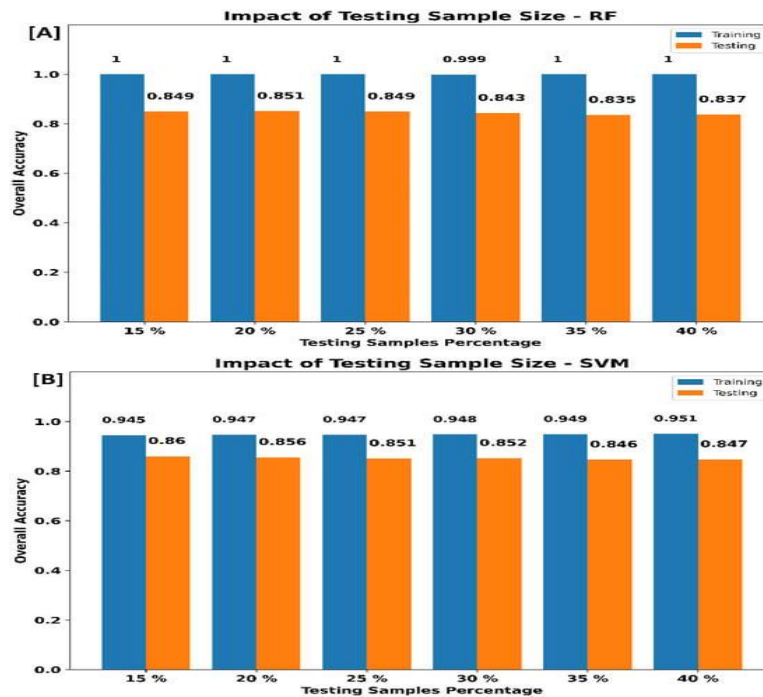


Рис. 10. Влияние размера тестовой выборки на точность данных тестирования в (А) RF и (В) SVM.

В результате важно помнить, что тот факт, что модель может достигать очень высокой точности обучения, не обязательно означает, что это хорошая модель, несмотря на ее вышеупомянутую ценность. Однако точность тестирования всех моделей отличается примерно на 15%. Это может быть признаком переоснащения в этом режиме. Кроме того, влияние размера выборки для тестирования с использованием SVM на общую точность как обучения, так и тестирования можно увидеть на рисунке 10B. Он показывает, что общая точность обучения повышалась по мере увеличения размера тестируемой выборки. Однако точность тестирования, как правило, ниже при большем размере выборки.

4.6. Оценка DEM как дополнительная функция для ввода данных.

В этом разделе оценивается эффект от добавления цифровой модели рельефа (DEM) в качестве входных данных для алгоритмов ML. В целом, добавление DEM немного повысило общую точность (рис. 11). Наиболее заметные результаты были получены для RF, который был улучшен примерно на 1,6% по сравнению с другими алгоритмами.

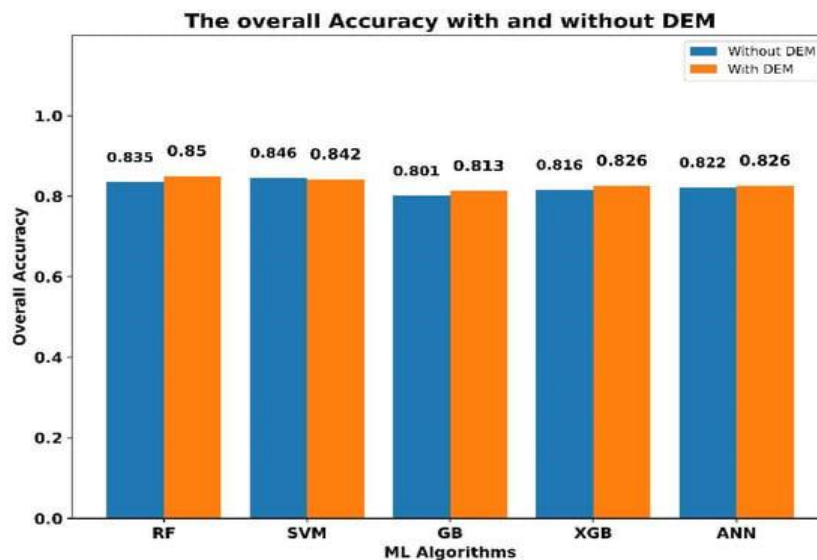


Рис. 11. Общая точность различных алгоритмов ML с включением DEM и без него.

5. Обсуждение.

Одним из факторов, который необходимо учитывать при литологическом картировании, является специфическая спектральная отражательная способность, связанная с каждым минералом. Другими словами, литологические единицы состоят из смеси спектральных отражений от минералов, составляющих их состав. Размер пикселя - еще один фактор, который необходимо учитывать при классификации литологических единиц. Следует отметить, что разные наборы данных генерируют пиксели разного размера. Даже в одном конкретном датчике различные спектры имеют разное разрешение. В этом исследовании полосы ASTER были пересчитаны до разрешения полос VNIR (т. е. 15 м). Согласно результатам FI, полосы TIR

и индексы, которые были связаны с этими полосами, имеют более высокую точность. Однако разрешение TIR более грубое, чем у других спектральных областей (VNIR и SWIR). Включение тепловых данных с более низким разрешением может привести к более точному литологическому картированию. Тем не менее, следует отметить, что некоторые классы были узкими и вытянутыми в исследуемой области. Следовательно, классификация этих классов может быть сложной, поскольку в случае высокого пространственного разрешения два или более литологических класса смешиваются в одном пикселе. Низкое пространственное разрешение из-за слишком большого количества детализированных объектов также может представлять проблему. Еще одним параметром, который может повлиять на общую точность алгоритмов ML, является способ отбора обучающих и тестовых образцов. Существовала некоторая неопределенность при выборе обучающих образцов на основе визуальной интерпретации геологических карт. Тем не менее, обучающие и тестовые образцы были выбраны случайным образом в этом исследовании. Кроме того, обучающие модели были повторены с помощью разнообразных обучающих выборок, и была достигнута средняя точность в различных ситуациях, чтобы гарантировать стабильность общей точности этого исследования.

В этом исследовании изучалась точность пяти алгоритмов ML (RF, SVM, GB, XGB и ANN с глубоким обучением) для картографирования литологических единиц в районе добычи меди Сар-Чешме и сравнивалась их общая точность друг с другом. Здесь проведено сравнение с другими исследованиями алгоритмов ML в литологическом картографировании. Использовали мультиспектральные данные Sentinel-2 и радиометрические данные для оценки потенциала SVM для классификации 13 литологических классов в Египте, включая магматические, метаморфические и осадочные породы. Их набор данных содержал от 955 до 3397 наблюдений для каждого класса для обучения модели. Общая точность от 0,756 до 0,857. Исследовали потенциал нескольких форм изображений ДДЗ, включая Sentinel-2, ALOS PALSAR и DEM, вместе с геофизическими данными. Сюда вошли магнитные и электромагнитные данные для составления карты литологии Индонезии с использованием RF-алгоритма. Их количество обучающих выборок в классе составляло от 14 до 337. Сообщили о точности от 0,73 до 0,81 для классов литологии. Использовали несколько форм ДДЗ, включая Landsat 8 OLI, DEM и ALOS PALSAR, для оценки литологического картирования в Марокко. Сообщили об общей точности 0,85 с использованием алгоритма SVM ML. Сообщили, что добавление данных SAR и DEM улучшило общую точность модели примерно на 10%. Сообщили, что SVM и ANN были более точными, чем RF. В текущем исследовании SVM превзошел другие алгоритмы ML по общей

точности в районе Сар-Чешме. Добавление DEM не смогло существенно повысить общую точность алгоритмов ML (<2%).

Согласно таблице 2, количество обучающих выборок для младших и основных классов в этом исследовании значительно отличается, поэтому коэффициент дисбаланса довольно высок. Количество объектов также достигло 33 (как диапазонов, так и индексов). Это разъясняет, что в этом исследовании столкнулись со сложной проблемой, о чем свидетельствует точность, которая была сообщена для данного класса полевошпатовых даек почти всеми моделями, учитывая, что в нем было наименьшее количество точек выборки данных. Учитывая вышеуказанные условия, ясно, что результаты всех алгоритмов ML обеспечивали относительно высокую точность. Один из способов повысить точность алгоритмов ML в этом исследовании - просто добавить больше данных для обучения модели. Также следует отметить, что добавление данных не всегда является лучшим вариантом в алгоритмах ML. Добавление дополнительных данных, таких как геофизические измерения, может повысить точность. Одним из ограничений таких алгоритмов ML является наличие растительности, влияющей на спектральную информацию, и, следовательно, на точность классификации. Однако регион, для которого проводился анализ, был засушливым, без обширной растительности. Наличие растительности на исследуемой территории можно определить с помощью радиолокационного покрытия с синтезированной апертурой (SAR) (в зависимости от типа и высоты растительности).

6. Выводы.

В этом исследовании использовались пять алгоритмов ML, а именно RF, SVM, GB, XGB и ANN глубокого обучения вместе с мультиспектральными наборами данных ASTER, для оценки точности литологического картирования в районе Сар-Чешме. В этом исследовании рассматривались два сценария.

Во-первых, спектральные полосы ASTER и некоторые особенности были предоставлены в качестве входных данных для моделей. Затем применили RF-FI ко всем функциям. Учитывая объекты с абсолютной корреляцией, превышающей 0,90, менее важные были удалены, а остальные объекты были предоставлены в качестве входных данных моделей.

Среди выбранных алгоритмов ML в этом исследовании SVM-модель обладает более высокой точностью, чем все другие классификационные модели в литологическом картировании. Общая точность SVM-модели составила 85%.

Результаты RF FI показали, что данные ASTER TIR имеют большее значение, чем другие диапазоны ASTER. Результаты также показали, что объединение всех характеристик без учета RF FI обеспечивает несколько лучшую точность классификации.

Общая точность литологического картирования с использованием всех диапазонов и особенностей показала, что SVM обладает самой высокой общей точностью (0,85) по сравнению с другими алгоритмами ML. Результаты также показали, что добавление дополнительной информации, такой как DEM (цифровая модель рельефа), может немного повысить общую точность. Увеличение объема тестирования также может привести к снижению общей точности теста. Среди всех классов аллювий – самая высокая точность, в то время как полевошпатовые дайки показали более низкую точность.

В целом, результаты показали, что алгоритмы ML могут отображать литологию, используя данные ASTER, что важно с экономической точки зрения, экономя время и ресурсы при полевых работах. Тем не менее, полевая заверка необходима.

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. David Quirt and Antonio Benedicto. «LEAD ISOTOPES IN EXPLORATION FOR BASEMENT-HOSTED STRUCTURALLY CONTROLLED UNCONFORMITY-RELATED URANIUM DEPOSITS: KIGGAVIK PROJECT (NUNAVUT, CANADA)». *Minerals* 2020, 10.
3. Hazhir Bahrami, Pouya Esmaeili, Saeid Homayouni, Amin Beiranvand Pour, Karem Chokmani and Abbas Bahroudi. «MACHINE LEARNING-BASED LITHOLOGICAL MAPPING FROM ASTER REMOTE-SENSING IMAGER». *Minerals* 2024, 14.
4. Marie-Chloé Michaud Paradis, François R. Doucet, Kheireddine Rifai, Lütfü Ç. Özcan, Nawfel Azami and François Vidal. «ECORE: A NEW FAST AUTOMATED QUANTITATIVE MINERAL AND ELEMENTAL CORE SCANNER». *Minerals* 2021, 11.
5. Mehdi Honarmand and Hadi Shahriari. «GEOLOGICAL MAPPING USING DRONE-BASED PHOTOGRAMMETRY: AN APPLICATION FOR EXPLORATION OF VEIN-TYPE CU MINERALIZATION». *Minerals* 2021, 11.
6. 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.
7. Yongzai Xi, Yongbo Li, Junjie Liu, Shan Wu, Ning Lu, Guixiang Liao and Qiule Wang. «APPLICATION OF ANALYTIC HIERARCHY PROCESS IN MINERAL PROSPECTING PREDICTION BASED ON AN INTEGRATED GEOLOGY-AEROGEOPHYSICS-GEOCHEMISTRY MODEL». *Minerals* 2023, 13.