



ФГБУ «ВИМС»

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

№ 8

Редактор-составитель: В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

Стр.

1. СОЗДАНИЕ ПРОГНОЗНЫХ КАРТ УРАНА «ТИПА НЕСОГЛАСИЯ» на основе нечетко-логического моделирования минерального потенциала «МРМ». бассейны Атабаска (Канада), СЗ МакАртур (Австралия) [2]	5
Введение.....	5
1. Прогнозно-поисковые критерии и признаки.....	6
1.1. Общие сведения.....	6
1.2. Основные геологические критерии.....	9
1.3. Геохимические критерии и признаки.....	11
1.4. Геофизические критерии и признаки.....	12
2. Компиляция и оценка доступных пространственных данных.....	14
3. Геофизические линеаменты на основе потенциальных данных.....	16
4. Создание карт прогнозных критериев.....	18
4.1. СЗ бассейн Макартур.....	19
4.2. Бассейн Атабаска.....	20
5. Пространственные взаимосвязи между оруденением урана и критериями его формирования.....	21
5.1. Весомость доказательств.....	21
5.1.1. СЗ бассейн Макартура.....	26
5.1.2. Бассейн Атабаска.....	27
5.2. Присвоение нечетких весов.....	29
5.3. Комбинирование прогнозных критериев и признаков.....	32
5.4. Источники статистической аномальности в МРМ.....	37
5.5. Объективное определение структуры.....	38
5.6. Интерпретация результатов МРМ с нечеткой логикой.....	39
6. Выводы.....	44
 2. РЕГИОНАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ W, Sn и Nb-Ta на основе нечетко-логического моделирования минерального потенциала «МРМ» интегрированная информация по Руанде (Центральная Африка) [7]	46
Введение.....	46
1. Область исследования.....	48
1.1. Геологические условия.....	48
1.2. Металлогенетические характеристики.....	49
2. Методы исследований.....	50
2.1. Обработка данных.....	50
2.2. Моделирование.....	54
2.3. Прогнозирование.....	56
3. Результаты.....	58
3.1. Показатели RF.....	58
3.2. Металлогенетические пояса и перспективные районы.....	59
4. Обсуждение.....	63
5. Выводы.....	64
 3. ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ RZM методом LIBS с использованием интервала PLS м-ния Норра-Карр, Олсерум (Швеция) и Фен-Комплекс (Норвегия) [4]	66
Введение.....	66
1. Материалы и методы.....	68

1.1. Образцы и эталонный анализ.....	68
1.1.1. Геологический обзор месторождений.....	68
1.1.2. Подготовка синтетических образцов.....	70
1.2. Инструментальная настройка LIBS и параметров измерения.....	71
1.3. Обработка и анализ данных одномерными и многомерными методами.....	71
2. Результаты.....	72
2.1. Структура спектров РЗЭ.....	72
2.2. Одномерная регрессия.....	74
2.2.1. Одномерная регрессия синтетических образцов.....	75
2.2.2. Одномерная регрессия полевых образцов РЗЭ.....	76
2.3. Характеристика матричных эффектов с помощью PCA.....	77
2.4. Интервальная регрессия методом частичных наименьших квадратов (iPLS).....	80
3. Выводы.....	82
4. МАГМА-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ФЛЮИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	
при формировании Sn и W в гранитах	
<i>пояс Кибара (Демократическая Республика Конго) [1]</i>	84
Введение.....	84
1. Геологические характеристики КИБ.....	86
2. Микроанализы рудных минералов (SEM-CL, EPMA, EDS и LA-ICP-MS).....	91
3. Результаты.....	96
3.1. Sn-W минералы и их микротекстуры.....	96
3.2. Составы касситерита и вольфрамита.....	98
3.3. Петрографические описания флюидных включений КИБ.....	99
3.4. Микротермометрия FI и расчет плотности флюида-давления.....	101
3.5. Рамановская спектроскопия на FIAs.....	103
4. Обсуждение.....	104
4.1. Структура и геохимия руд.....	104
4.2. Гидротермальные изменения.....	105
4.3. Ограничения включения флюидов.....	106
4.4. Процессы осаждения Sn-W.....	107
5. Выводы.....	108
5. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОРУДЕНЕНИЯ	
на основе теории фракталов и анализа Фрай	
<i>металлогенический пояс Ненцзян–Хэйхэ, Северо Восточный Китай [6]</i>	
Введение.....	110
1. Геологические предпосылки.....	111
2. Методы.....	113
2.1. Предварительная обработка и картирование линеаментов.....	113
2.2. Фрактальная модель с подсчетом блоков.....	114
2.3. Анализ Фрай.....	116
3. Результаты и обсуждение.....	117
3.1. Анализ результатов выделения линейных структур.....	117
3.2. Анализ линейных конструкций на основе фрактальной размерности.....	119
4. Выводы.....	124
6. ДДЗ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ	
в регионах, покрытых растительностью: методы, проблемы и возможности [5]	
Введение.....	126
1. ДДЗ.....	128
1.1. Оптические снимки ДЗ.....	128

1.2. Радар с синтезированной апертурой.....	130
2. Методы.....	132
2.1. Извлечение признаков.....	132
2.2. Методы классификации.....	135
3. Составление литологическое карт в районах с плотной растительностью.....	139
3.1. Выбор источника данных и его влияние.....	139
3.2. Сравнительный анализ различных методов выделения признаков.....	142
3.3. Выбор и применение методов классификации.....	145
4. Обсуждение и будущие возможности.....	147
5. Выводы.....	150
7. АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ASTER	
для определения поисковых признаков подформных хромитов	
<i>район Хойского офиолита, Северо Западный Иран [3]</i>	151
Введение.....	151
1. Описание офиолитового комплекса Хой.....	153
2. Результаты исследований.....	154
2.1. Методология.....	155
2.2. ДЗ в исследуемом районе.....	157
2.2.1. Соотношение полос.....	158
2.2.2. Анализ РСА.....	160
2.2.3. Картограф спектральных углов.....	163
3. Выводы.....	165
<i>ИСТОЧНИКИ:</i>	166

**1. СОЗДАНИЕ ПРОГНОЗНЫХ КАРТ УРАНА «ТИПА НЕСОГЛАСИЯ»
на основе нечетко-логического моделирования минерального потенциала «МРМ»
бассейны Атабаска (Канада), СЗ МакАртур (Австралия)**

Введение.

Методы моделирования минерального потенциала можно разделить на два типа:

1. Подходы, основанные на эмпирических обучающих данных для количественной оценки пространственных связей между известными рудными объектами и различными геологическими характеристиками.

2. Подходы, основанные на концептуальных знаниях, используют мнение эксперта для субъективного присвоения степени перспективности на основе воспринимаемой важности конкретной геологической характеристики в минеральной системе.

Основанные на знаниях подходы к разведке урана (например, МРА с нечеткой логикой) полностью основаны на концептуальных моделях нацеливания на уран и могут выполняться без необходимости в обучающем наборе данных известных рудных объектов

Общий подход, используемый в МРМ, заключается в том, что веса присваиваются либо на основе статистических показателей, либо когнитивно признакам, представленным в наборе прогнозных карт. Затем можно использовать различные интегрирующие функции для объединения растрованных слоев доказательств, чтобы получить показатель перспективности для каждой единицы площади (представленной пикселем). Ключевым соображением является то, что все растрованные прогнозные карты построены таким образом, что их пиксели имеют одинаковый размер и выровнены, чтобы можно было выполнять математические операции попиксельно (рис. 1).

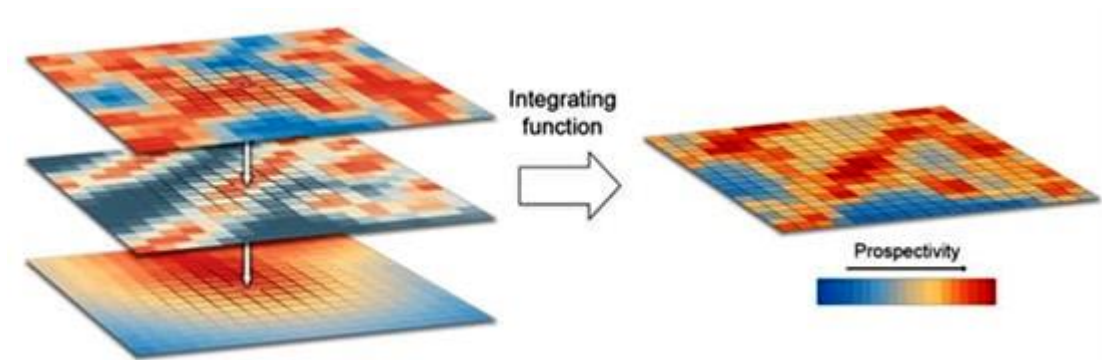


Рис. 1. Объединение слоев доказательств с растровой математикой.

Веса, присвоенные объектам прогнозной карты, преобразуются в пиксельные значения во время растеризации. Затем для объединения растрованных слоев доказательств могут быть использованы различные интегрирующие функции. Обычно это включает выполнение математических операций между географически выровненными пикселями, в результате чего получается числовая сетка значений, представляющих относительную перспективность.

Прогнозные карты могут быть использованы в качестве показателя относительной перспективности различных участков в интересующей области.

Гибридные подходы включают аспекты обоих методов.

Для прогнозирования уранового оруденения «типа несогласия» в большинстве случаев используется статистически ориентированный подход, основанный на знаниях. Нечеткие веса, присвоенные прогнозным картам и их характеристикам, зависят как от статистических данных (т. е. весовых коэффициентов доказательств), так и от мнений группы экспертов-геологов, знакомых с моделью минерализации. Подход включает следующие этапы:

- Создание перечня всех соответствующих данных ГИС и оценка их пригодность для МРМ.
- Построение прогнозных карт (на основе исходных данных), применительно к рассматриваемым моделям минерализации.
- Проверка пространственных взаимосвязей признаков с известными месторождениями, используя вес доказательств.
- Применение соответствующих нечетких весов к прогнозным картам и их характеристикам, основываясь на уроках, извлеченных из статистических оценок, и их предполагаемой важности в модели рудогенеза.
- Растривание прогнозных карт, используя нечеткие веса в качестве значений пикселей.
- Комбинирование «взвешенных» прогнозных карт с сетью нечеткого логического вывода.

1. Прогнозно-поисковые критерии и признаки.

1.1. Общие сведения.

Во время первой волны разведки в Атабаске, которая проводилась в основном на поверхности, было обнаружено только около 20% известных запасов урана. Поиск остального потребовал достижений в глубинной геофизике и геологических моделях. Несмотря на это, большинство находок было сосредоточено на восточном краю бассейна, где зона несогласия является самой «мелкой».

В настоящее время разведка распространяется по всему бассейну площадью 100 000 кв. км в результате более сложных технологий, лучшего понимания геологии, высоких цен на уран и поисковых успехов в районах, ранее считавшихся малоперспективными.

Эволюционировала аэрофизика, что позволяет обеспечить более глубокую визуализацию, открывая области бассейна, которые не могли быть изучены во время предыдущих исследований. Современные методы позволяют обнаруживать цели под почти

километровым слоем песчаника, на глубине, которая была бы немыслима всего несколько лет назад. Разрешение данных также улучшилось – приблизилось или превысило разрешение наземных съемок – что позволяет проводить прямое бурение по аэро-результатам.

Магнитные и электромагнитные (ЭМ) съемки высокого разрешения позволяют обнаружить особенности фундамента там, где они совпадают с графитовыми зонами, основным маркером залежей урана. Например, комбинированные электромагнитные и магнитные исследования GEOTEM с воздуха над районом Ши-Крик на западном краю бассейна выявили несколько проводящих зон на глубинах 700 метров и более, которые были успешно дополнены наземной геофизикой и бурением. Вариант GEOTEM, называемый MegaTEM, имеет примерно вдвое большую выходную мощность и может обнаруживать даже более глубокие проводники. Новая система ЭМ под названием Tempest имеет лучшее разрешение по удельному сопротивлению чем GEOTEM и может картировать структуры с умеренным удельным сопротивлением в песчаниках, которые могут указывать на зоны гидротермально-метасоматических изменений.

Гравика с высоким разрешением (например, FALCON от ВНР) также может выявлять благоприятные структурные особенности в проводящих зонах в комплексе с сейсмическими исследованиями для получения изображения зоны несогласия и связанных с ней структурных особенностей.

После того, как с помощью геофизики определяется перспективная геологическая обстановка, необходимо проведение геохимического отбора проб. Фоновый геохимический состав бассейна Атабаски низкий, поэтому могут быть обнаружены даже незначительные обогащения ключевыми элементами. Набор исследуемых элементов включает U, В, Рb, Ni, Cu, As, Co, Mo, Zn, V и редкоземельные элементы.

Однако использование геохимии ограничено тем фактом, что месторождения типа «несогласия» имеют небольшой размер и обычно залегают на значительных глубинах. Площадь обнажения горных пород Атабаски составляет менее 1% и покрыта слоем ледниковых отложений глубиной до 100 метров. Поскольку ледниковая вскрыша преобладает, отбор проб валунов из песчаника эволюционировал для обнаружения отчетливых геохимических сигнатур, или ореолов изменений, связанных с урановой минерализацией. Исследования гидротермальных изменений вокруг урановых месторождений показывают, что эти ореолы могут простираться вверх иногда через сотни метров песчаника и, соответственно, в ледниковый слой. В результате отбор проб валунов превратился в эффективное средство обнаружения ореолов изменений, поскольку литогеохимические аномалии, обнаруженные в валунах, почти такие же как и в

материнских породах. Даже когда сигнатура слабая, для обнаружения изменений используются усовершенствованные аналитические методы с более низкими пределами обнаружения урана, бора и свинца. Относительная скорость и экономичность отбора проб валунов по сравнению с другими поисковыми методами делают его экономичным способом определения ореолов изменений, сопровождающих урановое оруденение. Будущее геохимических исследований в бассейне Атабаски заключается в совершенствовании методов и разработке технологий отбора проб поверхности, которые могут непосредственно обнаруживать минерализацию.

В то время как наземные электромагнитные съемки когда-то обычно использовались для последующей аэросъемки с более глубоким проникновением через песчаник, в настоящее время они чаще используются самостоятельно для получения подробной оценки интересующих объектов. Системы во временной области, такие как Stone, Geonics и UTEM EM, являются наиболее популярными, чем системы в частотной области, такие как Zonge и Phoenix. Оба типа способны к глубокому проникновению под проводящим покрытием.

Так в районе Ши-Крик при обследовании массива движущихся петель UTEM III был выявлен мощный проводник. Последующая буровая скважина, третья по проекту, пересекла зону сдвига, содержащую уран, на глубине 705 м с содержанием 0,62% U_3O_8 на протяжении 0,7 м. Последующие исследования подвижных петлевых массивов сыграли важную роль в расширении проводника более чем на 30 км и выборе целей для бурения. М-ние Энн в Ши-Крик в настоящее время оценивается в 47 миллионов фунтов. Содержание U_3O_8 в среднем составляет 3%. и оруденение остается открытым.

Новые разработки включают в себя системы сбора и анализа массивов данных, такие как Titan от Quantec, которые намного более продвинуты с точки зрения сбора данных и последующей обработки. Например, Titan может получать данные о магнитотеллурической (MT) и индуцированной поляризации (IP) одновременно, снижая затраты на сбор данных для каждого метода.

Одним из наиболее значительных изменений в технике поискового бурения по мере углубления поисков в бассейне Атабаска является использование направленного бурения. Технология, впервые разработанная Cogema на месторождении Ши-Крик, позволяет производить несколько пересечений из одной контрольной скважины, снижая затраты на бурение и значительно повышая точность определения цели. Методы ориентации керна также используются в Shea Creek и других проектах по разведке, чтобы лучше понять геологию и структурный контроль минерализации.

Поиски урана требуют сбора больших массивов разнородных данных. Геологи должны собирать и интерпретировать массивы структурных, стратиграфических,

петрографических, химических и др. данных, чтобы определить, оправданы ли дальнейшие поиски. Для этого требуются продвинутое системы управления данными.

1.2. Основные геологические критерии.

Основным критерием поисков первого порядка является палео-мезопротерозойские бассейны, описанные выше в разделе геологические атрибуты континентального и районного масштаба. Они заполнены красноносными отложениями, как правило, субгоризонтальными, мощностью до 2 км и представлены преимущественно терригенно-обломочными толщами с преобладанием кварца, речными конгломератами, песчаниками и аргиллитами. Первоначальная мощность этих красных слоев, вероятно, была намного больше. Другие типы пород являются второстепенными или завершают последовательности красных пластов. Все примеры урановых м-ний типа несогласия связаны с такими последовательностями. Перспективы ряда таких слабоизученных бассейнов в Канаде и во всем мире очевидны.

Еще один критерий первого порядка – комплексы фундамента, которые характеризуются относительно высокие содержания U, намного выше Кларка (около 5 ppm). Они деформированы и метаморфизованы, тектонически чередуются архейские и палеопротерозойские ортогнейсы и парагнейсы, прорваны гранитоидными плутонами и пегматитовыми телами. Позднепалеопротерозойские гранитоидные массивы и пегматиты в ходе регионального глубокого метаморфизма и анатексиса метаосадочных пород богаты K-Th-U, содержащихся в таких минералах, как монацит, циркон и уранинит.

Эмпирические критерии второго порядка, связанные с рудами «несогласия» включают графитовый метапелит, пластические дефекты и другие структурные характеристики (зоны растяжения или сжатия, изгибы, бифуркации, splays, дуплексные и поперечные конструкции) фундамента. Повторяющиеся хрупкие реактивации пластичных структур компенсировали базальное несогласие и были очагами флюидов и минерализации. Структуры реактивации в песчанике можно проследить по зоне первичного разлома фундамента. Возобновленные зоны разломов могут быть локализованы на шарнирных линиях, которые разделяют суббассейны осадконакопления. Те изгибы, которые развились до и при осадконакоплении обеспечивали наиболее интенсивную «подготовку среды» к минерализации. Так в бассейне Атабаска первая урановая руда была сформирована вовремя и после отложения верхней толщи.

Палеодолины и постседиментационные смещения базального несогласия являются предпосылками для формирования м-ний мирового класса, например, Сигар Лейк сформирована на небольшой возвышенности фундамента. Пересечения разнонаправленных систем крутопадающих разломы особенно значимы, например, на м-нии Макартур.

Рудовмещающие бассейны демонстрируют геохимические характеристики региональных глинистых изменений пород и развитие локальных окислительно-восстановительных

процессов на границах и в пределах всей последовательности красноцветных песчаников. Локальные ореолы гидротермальных изменений калиевых глин (иллит), борсодержащие минералы (дравит), кварцевый цемент и растворение кварца являются основными векторами детальных поисков. Эти особенности тщательно регистрируются во время ГРП с помощью точечного минералогического анализа с использованием спектрометров коротковолнового инфракрасного излучения (SWIR) такие как PIMA II © (Integrated Spectronics Ltd.) и FieldSpec Pro. Откалиброванные программные алгоритмы для полуколичественного анализа усиливают полезность этих спектрометров. Спектрометрические методы могут быть полностью количественными, учитывая калибровку пикового разрешения с соответствующими минеральными стандартами и использование искусственного интеллекта для разработки наиболее подходящих алгоритмов. Особенно полезна инфракрасная спецификация (тронметрия) для различения каолинит-групповые полиморфы каолинита и дикита.

Были проанализированы парагенезисы бассейнов Атабаски, Телона и Комболджи, чтобы оценить, какие из этих параметров могут иметь решающее значение для поисков. Был выявлен ряд различий между этими бассейнами - высокая перспективность Атабаски и средняя Телона и Комболджи. Эти сравнения представлены на рисунке 2.

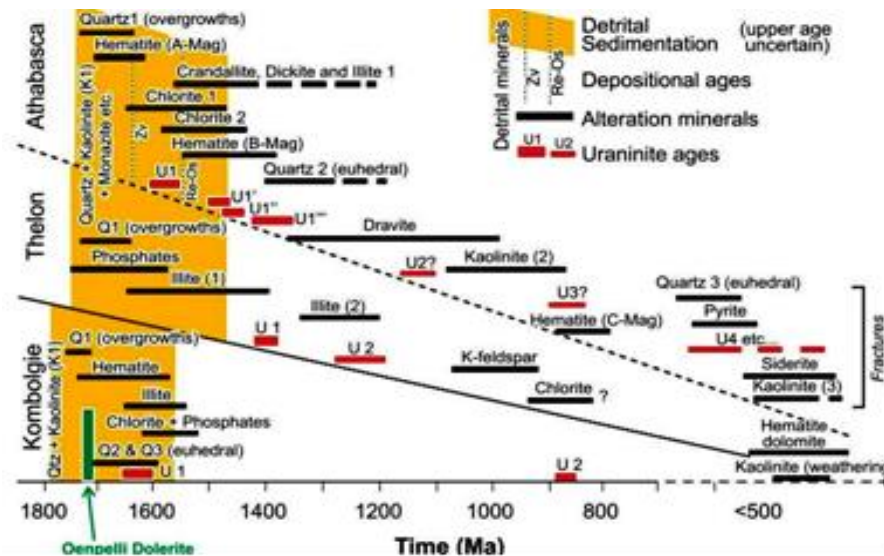


Рис. 2. Упрощенный парагенезис минералов палео-мезопротерозойских бассейнов Атабаска, Телон и Комболджи, (Возраст первичного уранинита U1 (~1500-1600) и U1' (~1350-1400) в бассейне Атабаска. Возраст осадконакопления в группе Атабаска - Zr: U-Pb на вулканическом цирконе. в формации Wolverine Point и Os-Re: первичное органическое вещество в Формация Дуглас.)

Крандаллит в бассейне Атабаска не является раннедиагенетическим минералом, а околопиковым диагенетическим. Циркон не изменен регионально, хорошо сохранившийся. Измененный циркон демонстрирует поглощение U, а не его выщелачивание. Сильная коррозия циркона локальна. Диагенетический ксенотим, зарастающий цирконом практически не содержит U, тогда как вмещающий диагенетический апатит содержит U. Эта форма данных обеспечивает основу для дальнейшего понимания эволюции этих бассейнов. Требуется гораздо больше исследований, чтобы установить региональный парагенетический каркас и

различать альтерацию этого вектора к руде в процессе диагенеза. Продукты изменений регионального масштаба являются полезными для оценки минерального потенциала бассейнов.

1.3. Геохимические критерии и признаки.

Геохимия озерной воды и отложений были важными инструментами в начале региональных поисков. Еще одна ранняя геохимическая методика включала измерение и оконтуривание излучения радона как выражение радиоактивного распада, связанного с нижележащими рудными залежами урана.

Анализ опробования деревьев (веточки ели) показали, что район МакКлин-Лейк-Рэббит-Лейк расположен посреди огромной биогеохимической аномалии, которая была интерпретирована как результат извлечения корнями деревьев аномального U из подземных вод. Подземные воды сами по себе являются полезная исследовательская среда, особенно учитывая долгую историю движения активных жидкостей в различной степени ограниченных дренажных системах в широко проницаемых толщах чехла и в трещиноватых породах фундамента.

Геохимия в различных средах отражает региональные и локальные минералогические изменения. Региональный фон U составляет от 1 до 2 ppm в озерных отложениях в группе Атабаска. Урановые аномалии в озерных отложениях достигают значений 1500 ppm в районе Ки Лейк. Значения в 13 ppm выявлены в «неизменном» песчанике над ореолом глинистых изменений на Сигар Лейк, сильно измененный песчаник в глинистой зоне - до 235 ppm и измененный фундамент - 95 ppm.

Измерение и определение контуров выбросов радона как выражение радиоактивного распада, связанного с нижележащей урановой рудой использовались для поисков в детальном масштабах.

По мере того, как разведка продвигалась к более глубоким целям, фокус смещался к выявлению изменений минералов, отраженному в поверхностной геохимии. Ореолы изменений калиевых глинистых минералов регионального масштаба (иллит), минералы бора (дравит), кварцевый цемент и др. пересекаются в разных соотношениях в настоящее время в четвертичном тилле. Эти аномалии на месте или перемещенные могут быть измерены с помощью гамма-спектрометрии. Иллит, хлорит, дравит, кварцевый цемент и др. являются основными локальными переносчиками в зонах входного или расширенного выходного типа оруденения. Эту минералогию можно анализировать в полевых условиях с помощью портативного коротковолновые инфракрасные (SWIR) спектрометры, такие как PIMA II© (Integrated Spectronics Ltd.) и FieldSpec Pro. Откалиброванные программные алгоритмы для полуколичественного анализа повышают полезность этих спектрометров.

Спектрометрические методы могут быть полностью количественными, т. к. калибровка пикового разрешения с соответствующими минеральными нормами и использование искусственных смесей позволяет разработать наиболее подходящие алгоритмы. Инфракрасная спектрометрия особенно полезна для различения между политипами каолиновой группы каолинита и дикита. Нормативные расчеты на основе литогеохимических данных уточняют минералогические идентификации.

Современная гамма-спектрометрия позволяет совместно анализировать наземные, аэробортовые и гамма-каротажные многопараметрические геофизические данные в качестве геохимических поисковых инструментов, в т. ч. прогнозные карты с учетом параметров течения палеольда. Развитие манипулирования данными и их представление в виде троичных отношений K, Th и U на одной карте облегчает интерпретацию взаимосвязей этих элементов для определения направления поисков. Минералогический и химический состав четвертичных отложения тесно связаны с местными коренными породами. Четвертичные отложения являются локальными индикаторами в отслеживании течения льда поверхностных материалов до их источников. В Атабаске коренная порода (гнейс фундамента или группа Атабаска) были транспортированы на борта бассейна на северо-восток (преобладающий ледоход) что было причиной некоторых линейных аномалий. Так же материал группы Атабаска был доставлен на гнейсовый фундамент и палеозойские толщи на юго-запад, следовательно, обнаруженные там аномалии могут представлять собой источник где-то подо льдом в бассейне. Это не исключает возможность аномалий, происходящих от отдаленных месторождения урана в фундаменте, над которыми чехол полностью разрушен.

1.4. Геофизические критерии и признаки.

Первоначальные поиски урана в Атабаске и подобных бассейнах были сосредоточены на поверхностных проявлениях радиоактивности, связанных с приповерхностным лруденением, расположенным по окраинам зон несогласия. Последующие исследования были сосредоточены на наземных электромагнитных методах для распознавания связи оруденения с графитовыми зонами. Эти методы были и остаются наиболее эффективным инструментом для определения расположения, глубины и характеристик глубинных проводников.

Аэромагнитная съемка дает возможность картографировать геологию фундамента с окраин протерозойских бассейнов к их центрам. Она определяет основные поисковые цели первого порядка, такие как разломы и благоприятные литологические подразделения фундамента, как например градиенты между архейскими гнейсовыми куполами в супергруппе Волластон, бассейн Атабаска.

Электромагнитные методы обнаруживают гидротермально-метасоматические изменения, связанные с рудой. Аэро-электромагнитная технология высокого разрешения,

получившая название Tempest, использовалась в Австралии для выявления скрытых низкоомных зон глинистых изменений пород фундамента и смещений разломов в зоне несогласия, а также богатые кварцем кремнистые зоны, характеризующиеся высоким удельным сопротивлением. Было показано, что высокое сопротивление отображает зоны высокой пористости, связанные с трещиноватостью и растворением и кварца в породах.

Аудиомагнитотеллурический метод разведки (АМТ) явился эффективным инструментом для картирования проводников в фундаменте на глубинах 2-3 км на м-нии McArthur River в бассейне Атабаска. Данные АМТ были собраны на 132 станциях по сетке. 2D и 3D-инверсии использовались для создания моделей удельного сопротивления. Эти модели показали проводник, совпадающий с крупным разломом фундамента, контролирующим оруденение в зоне несогласия на глубине 550 м. Он простирается на глубину не менее 3 км и сопровождается двумя резистивными ореолами окварцевания, связанными с урановой минерализацией.

Сейсморазведка — относительно новый инструмент поисков. Современные сейсмические отражения обеспечивают непрерывный структурный каркас в 2 и 3-D от ближней поверхности до нескольких километров ниже несогласия путем изменения частоты источника, разнесения сейсмоприемников и обработки данных, откалиброванных с помощью скважинной геофизики. Структурные разрезы могут быть интерпретированы с использованием локальных и общих структурных аналогов для определения основных поисковых параметров, таких как положение и структура зоны несогласия, а также разломы разных порядков.

Наземная и аэро- гравитационные съемки используются для выявления зон изменений - отрицательные аномалии силы тяжести (зоны растворения) или положительные аномалии (зоны окварцевания). Прямое обнаружение рудных тел месторождений представляет собой проблему из-за их небольших размеров, которые не отражаются в гравитационных аномалиях. Гравитационные данные также дают представление о геологической основе для поисков как в региональном, так и в районном масштабах. Эффективнее всего использовать их в сочетании с другими данными, которые могут помочь разрешить неоднозначности, связанные с такими факторами как мощность вскрышных пород, объемная плотность и структура фундамента.

Сообщается о первом применении *мюонной томографии* для поисков и разведки месторождений урана типа «несогласия». Мюонная томографии — это новый метод визуализации плотности оруденения под землей с помощью космических лучей. Метод был применен в бассейне Атабаска на м-нии McArthur River. В результате с помощью рентгенографического изображения и трехмерной инверсии плотности, была получена качественная оценка уранового оруденения на глубинах порядка 600 м. под землей. Стандартное отклонение параметров уранового оруденения в данных по мюонам не

превышало 5%, а соответствующая трехмерная инверсия плотности хорошо соответствовала данным скважинного опробования на месторождении и профилю урановорудных залежей.

Полученные результаты мюонной томографии показали их хорошее соответствие как данным бурения так и соответствующим геологическим моделям. Поисковые выводы из проведенных исследований сводятся к следующему:

1. Поисковый результат на основе мюонных исследований может быть достигнут путем перекрестных сравнений данных датчиков на разных глубинах.

2. Конструкция детектора и алгоритмы распознавания треков мюонов важны там, где фоновое излучение может быть значительным.

Будущее этой технологии заключается в разработке скважинных мюонных датчиков, применимых не только на выявленных месторождениях с существующей шахтной инфраструктурой, но и при буровых поисках скрытого оруденения.

2. Компиляция и оценка доступных пространственных данных

Был проведен тщательный аудит всех общедоступных пространственных данных для СЗ бассейна Макартур, Австралия и Северного Саскачевана, Канада с целью составления набора данных, которые можно было бы использовать в качестве факторов для компонентов генетических моделей минерализации. Территория канадского проекта была ограничена Саскачеваном из-за наличия высококачественных, единообразных наборов данных, на основе которых можно было создать подходящие прогнозные карты. В обоих случаях использовались многочисленные предконкурентные междисциплинарные наборы данных, находящиеся в свободном доступе у различных национальных и государственных/провинциальных геонаучных органов (Geoscience Australia, Геологическая служба Канады, Геологическая служба Северной территории и Геологическая служба Саскачевана).

Наборы данных, использованные в исследовании СЗ бассейна Макартур, включали геологическую карту (масштаб 1: 500 000), карту поверхности (масштаб 1: 100 000 000), карту разломов (масштаб 1: 500 000), гравитационные, магнитные и электромагнитные геофизические данные. Для бассейна Атабаски пригодные для использования наборы данных включали геологическую карту (масштаб 1: 250 000), карту разломов (масштаб 1: 250 000), аэро- и наземные карты электромагнитных (ЭМ) проводников, магнитные интерпретации докембрийских доменов, структурную интерпретацию из базы данных Extech IV Geoscience и гравитационно-магнитные геофизические данные. Исходные данные для исследований в СЗ бассейне Макартур и бассейне Атабаска приведены в таблицах 1 и 2 соответственно. Карты местоположения урановых месторождений и проявлений, не использовались в качестве

исходных данных для прогнозного моделирования, но использовались для оценки достоверности выходных данных.

Табл. 1.

Исходные данные для прогнозных карт МРМ СЗ бассейна Макартур.

Source Data	Derived Predictor Maps	Description
Solid Geology Interp 1:500,000 scale [114]; Surface Geology of Australia 1:1 million scale [151]	Simplified lithology	Modified and reduced to 13 generalised classes.
	Simplified stratigraphy	Stratigraphic data grouped by Eon
	Archean buffered	Mapped Archean complexes buffered at 5000 m intervals to 50 km
	Unconformity buffered	Current unconformity surface trace buffered at 5000 m interval to 50 km
Faults 1:500,000 scale [114]	Faults WNW buffered Faults NW buffered Faults NNW buffered Faults NNE buffered Faults NE buffered Faults ENE buffered	Faults separated into six orientation classes and buffered at 500 m intervals to 5 km.
Metamorphic/Igneous regions 1:500,000 scale [152]	Metamorphic regions	Nine classes of metamorphic region
Pine Creek isostatic residual (IR) gravity edges 1600 (Fathom Geophysics Australia—Derived from: [153])	Gravity 1600 WNW buffered Gravity 1600 NW buffered Gravity 1600 NNW buffered Gravity 1600 NNE buffered Gravity 1600 NE buffered Gravity 1600 ENE buffered	The '1600' filter isolates short wavelength lateral variations in gravity data which may represent structure concealed below cover—Data were split into six orientation classes and buffered at 500 m intervals to 5 km.
Pine Creek isostatic residual (IR) gravity edges 6400 (Fathom Geophysics Australia—Derived from: [153])	Gravity 6400 buffered	The '6400' filter isolates longer wavelength variations in gravity data. They are used here as proxies for 'deep' structural development zones—buffered at 1000 m intervals to 10 km.
Pine Creek Magnetics edges 1600 (Fathom Geophysics Australia—Derived from: [154])	Magnetics 1600 edge density	Line density function with a 10 km search radius used on proprietary '1600' edge detection data. Proxy for basement lithological complexity.

Табл. 2.

Исходные данные для прогнозных карт МРМ бассейна Атабаска.

Source Data	Derived Predictor Maps	Description
Solid Geology 1:250,000 scale [155]	Solid geology	Solid geology data reduced to 9 generalised classes.
Conductors—air [156]	Conductors (air)	Air electromagnetic conductors buffered to 50 m.
Conductors—ground [157]	Conductors (ground)	Ground electromagnetic conductors buffered to 50 m.
Faults 1:250,000 scale [158]	Faults WNW buffered Faults NW buffered Faults NNW buffered Faults NNE buffered Faults NE buffered Faults ENE buffered	Faults separated into six orientation classes and buffered at 200 m intervals to 2 km.
Magnetic Domains [159]	Magnetic domains	Mag interpretation of 19 Precambrian domains beneath Athabasca Basin.
Extech IV Faults [150]	Extech IV faults	Buffered at 2000 m intervals to 20 km. Used to represent large-scale, through-going basement structural development zones.
Canada 2 km isostatic residual (IR) gravity edges 1600 Fathom Geophysics Australia—derived from: [160]	Gravity 1600 WNW buffered Gravity 1600 NW buffered Gravity 1600 NNW buffered Gravity 1600 NNE buffered Gravity 1600 NE buffered Gravity 1600 ENE buffered	The '1600' filter isolates short wavelength lateral variations in gravity data, which may represent structure concealed below cover—Data split into six orientation classes and buffered at 500 m intervals to 5 km.
Canada 2 km isostatic residual (IR) gravity edges 6400 Fathom Geophysics Australia—Derived from: [160]	Gravity 6400 WNW buffered Gravity 6400 NW buffered Gravity 6400 NNW buffered Gravity 6400 NNE buffered Gravity 6400 NE buffered Gravity 6400 ENE buffered	The '6400' filter isolates longer wavelength variations in gravity data. They are used here as proxies for 'deep' structural development zones—split into six orientation classes and buffered at 1000 m intervals to 10 km.
Athabasca Basin 100 m Magnetics edges 1600 Fathom Geophysics Australia—Derived from: [161]	Magnetics 1600 edge density	Line density function with a 10 km search radius used on proprietary '1600' edge detection data. Proxy for basement lithological complexity.

Везде, где это возможно, целью было включать только те данные, которые обеспечивают единообразный и полный охват каждой области исследования. Геофизические наборы данных (гравитация и магнетизм), подготовленные Geoscience Australia и Геологической службой Канады, представляют собой выровненные компиляции многочисленных геофизических исследований, проведенных за несколько десятилетий. Широкий спектр оборудования, используемого при сборе исходных данных, и различия в параметрах съемки, таких как расстояние между линиями полета, приводят к значительным пространственным различиям в качестве общенациональных компиляций. Подборки представляют наилучшие доступные данные в масштабе этих исследований, но при интерпретации результатов необходимо учитывать их изначально неоднородный характер. Геофизические сетки обрабатывались с помощью набора запатентованных процедур «линейного обнаружения», разработанных австралийской компанией Fathom Geophysics.

3. Геофизические линеаменты на основе потенциальных данных.

Геофизические линеаменты могут определять местоположение разломов или оси различных структур. Картирование таких линейных объектов может быть полезным при поисках поскольку рудные тела часто расположены вдоль геофизических линейных объектов или на их пересечениях; по причинам, которые могут быть объяснены как геофизически, так и геологически.

На протяжении десятилетий интерпретаторы находили различные способы извлечения линеаментов из геофизических данных. Общий подход, предшествовавший достижениям в области вычислительных возможностей и мощности обработки данных, заключался в том, чтобы сначала отфильтровать данные, чтобы выделить интересующие признаки, а затем вручную провести линии вдоль сильных градиентов (ребер) и проследить закономерности повышенных или пониженных реакций (линии формы). Недостатком этого ручного подхода была присущая процессу субъективность. Автоматизированные подходы стали доступны в 1990-х годах, но результаты этих процедур (иногда карта с загруженными точками) обычно были неоднозначными.

Компания Fathom Geophysics разработала серию процедур для преобразования геофизических данных в продукты, которые можно было бы легко интегрировать в поисковых целях. Целью разработки этой технологии был переход к автоматизированной интерпретации магнитных и гравитационных данных, имитирующих человеческий подход к интерпретации изображений, в то же время соблюдая физику поля без какой-либо субъективности, привнесенной человеческой предвзятостью. Особенно важна была возможность наметить соответствующие границы в данных, скрытых под чехлом.

Большинство месторождений полезных ископаемых демонстрируют некоторую степень структурного контроля. Следовательно, точное отображение структурной архитектуры является критическим аспектом любой интерпретации и прогнозирования. Фильтр обнаружения структуры Fathom представляет собой алгоритм фазовой конгруэнтности, основанный на ориентированных экспоненциальных фильтрах. Полученные результаты являются мерой асимметрии независимо от амплитуды, что означает, что структуры в областях низкой контрастности выделяются так же хорошо, как и в областях высокой контрастности, при условии, что присутствует частотный диапазон извлекаемых структур (где частота коррелирует с масштабом и в значительной степени с глубиной). Это важно для областей, где структуры разделяют литологические единицы, проявляющие сходные магнитные свойства, и где магнитные отклики очень тонкие.

Линейные структуры встречаются в различных масштабах. Учитывая это условие, используемый здесь метод определения структуры является 'многомасштабным' по своей конструкции. В этом методе регистрируются только структуры, которые дают отклик более чем в одном масштабе (длина волны), при этом отбрасываются 'мономасштабные' признаки. Это требование к масштабированию важно тем, что оно устраняет «шум». Кроме того, линейные структуры могут быть классифицированы и извлечены на основе масштаба. Это полезно для различения особенностей, которые могут представлять фундаментальные разломы масштаба земной коры первого порядка (потенциальные пути для минерализованных флюидов, но не обязательно минерализованные сами), и тех, которые представляют разломы второго или третьего порядка, которые с большей вероятностью минерализуются при наличии плодородной минеральной системы. Эти результаты имеют неоценимое значение для геологической интерпретации, моделирования минерального потенциала и определения поисковых целей.

Линейные алгоритмы обнаружения также могут быть использованы для выделения структур любой конкретной ориентации или диапазона ориентации. Это полезно в тех случаях, когда структуры определенной ориентации считаются важными в рассматриваемой поисковой модели. Эта объективная оценка геофизических данных также может быть использована для определения доминирующих структурных характеристик рудных зон.

Линеаменты, полученные на основе гравитационных данных, представляют местоположение значительных поперечных изменений плотности. Обычно они представляют собой либо след разлома с вертикальным смещением, либо границу между двумя блоками с разной плотностью пород. Гравитационный фильтр запускается на двух разных частотах. В первом случае используется относительно короткая минимальная длина волны 1600 м для обнаружения «неглубоких» особенностей подповерхностного слоя. Во втором используется

минимальная длина волны 6400 м для обнаружения низкочастотных особенностей, которые обычно представляют глубокие зоны структурного развития (рис. 3). Гравитационные кромки с определенной ориентацией в соответствии с моделью минерализации были извлечены и использованы для каждого из бассейнов. Магнитные данные для бассейнов обрабатывались фильтром обнаружения границ с минимальной длиной волны 1600 м для обнаружения относительно неглубоких особенностей.

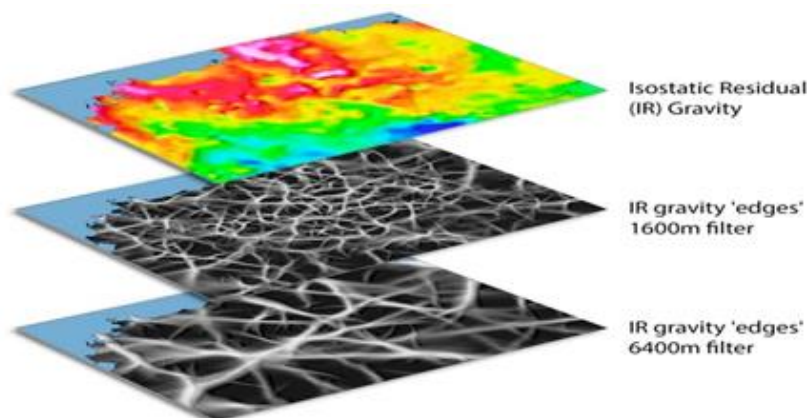


Рис. 3. Примеры геофизических границ, полученных на основе изостатических данных остаточной гравитации с использованием фильтров с различными длинами волн.

Высокочастотный выходной сигнал фильтра длиной 1600 м интерпретируется как представляющий особенности гравитации верхней части земной коры. Широкие особенности, очерченные фильтром длиной 6400 м, интерпретируются как глубинные структуры земной коры и потенциальные каналы для глубоко циркулирующих растворов.

Геофизические границы, возникающие в результате значительных боковых изменений физических свойств недр, могут возникать в различных геологических ситуациях, обычно из-за наличия разлома или литологического контакта. Однако нанесенные на карту геологические границы между соседними литологическими единицами, которые различаются только на основе визуальных свойств, не обязательно демонстрируют совпадающее изменение плотности или магнитной восприимчивости. Неглубокие контакты или разломы внутри однородных пакетов горных пород также с меньшей вероятностью будут обнаружены с помощью процедур.

Запуск процедур обнаружения линеаметов на хорошо выровненном и объединенном наборе магнитных или гравитационных данных позволяет получать результаты, которые можно с уверенностью отнести к подлинным характеристикам недр.

4. Создание карт прогнозных критериев.

Понятие о минеральных системах было использовано для построения моделей минерального потенциала урана «типа несогласия» в бассейнах СЗ Макарура и Атабаска. Внимание было уделено компонентам системы: «Источник - Транспорт – Ловушка». Однако,

поскольку «Источником» м-ний бассейнов Атабаска и СЗ Макартур можно считать сами бассейны, перспективности термину «Источник» присвоено значение «1».

Следовательно, модели упрощены и включают только компоненты парадигм «Транспорт» и «Ловушка». «Транспортные» критерии представлены характеристиками глубоко проникающих в фундамент зон сдвигов, которые потенциально могут выступать в качестве каналов для циркуляции растворов. Критерии «Ловушки» включают структуры верхней коры, восстановители, зоны повышенной структурной сложности и сильного химического контраста в фундаменте и на зоне несогласия.

4.1. СЗ бассейн Макартур.

Карты использованных прогнозных критериев показаны на рисунке 4 и в таблицах 1, 2.

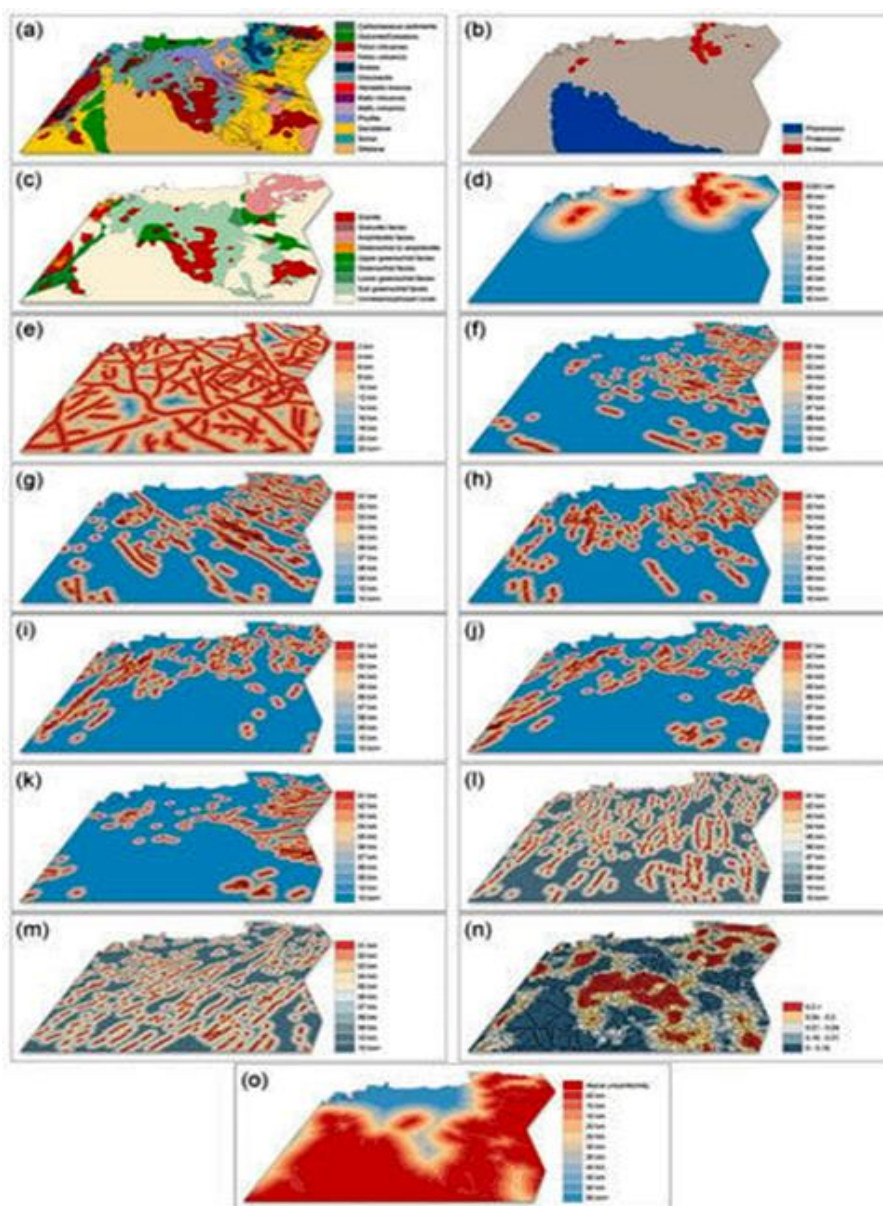


Рис. 4. Прогнозные критерии СЗ бассейна Макартур: (а) упрощенная геология, (б) упрощенная стратиграфия, (с) метаморфические регионы. Буферизованные: (д) архейский фундамент, (е) гравитационные границы 6400, (ф) разломы WNW, (г) разломы NW, (h) разломы NW, (i) разломы NNE, (j) разломы NE, (к) разломы ENE, (l) гравитационные границы 1600 NNE, (m) гравитационные границы 1600 NE, (n) магнитная плотность границ 1600 и (о) зоны несогласия.

Разломы были разделены на шесть классов ориентации, прежде чем вокруг этих объектов были построены многокольцевые буферы. Это позволяет модели отдавать предпочтение одному набору структурных ориентаций перед другим, где предполагается генетическая связь с минерализацией урана.

Интерпретация метаморфических и магматических комплексов была использована для определения девяти классов метаморфических регионов. Области, где зона несогласия скрыта под отложениями, заполняющими бассейн, окрашены темно-красным цветом.

Гравитационные данные обрабатывались с помощью процедур обнаружения границ. Как и в случае с данными о разломах, векторизованные гравитационные границы с помощью фильтра длиной 1600 м были разделены на шесть классов ориентации и буферизованы. Для выделения более длинноволновых характеристик в тех же данных о гравитации использовался фильтр длиной 6400 м. Они были буферизованы и объединены в единый критерий, который использовался в качестве фактора глубинности, который, возможно, действовал как канал для глубинных циркулирующих минерализованных флюидов.

Для магнитных данных использовались процедуры обнаружения границ с фильтром 1600 м для обнаружения относительно неглубоких особенностей. Затем функция линейной плотности с радиусом поиска 10 км была использована для создания критерия плотности магнитных границ 1600. Этот слой предназначен для определения областей повышенной структурной/литологической сложности фундамента (т.е. тектонически активных зон, где сходятся многие линейные структуры).

4.2. Бассейн Атабаска

Карты прогнозных критериев, построенных для бассейна Атабаска, показаны на рисунке 5 (исходные данные – в таблице 2).

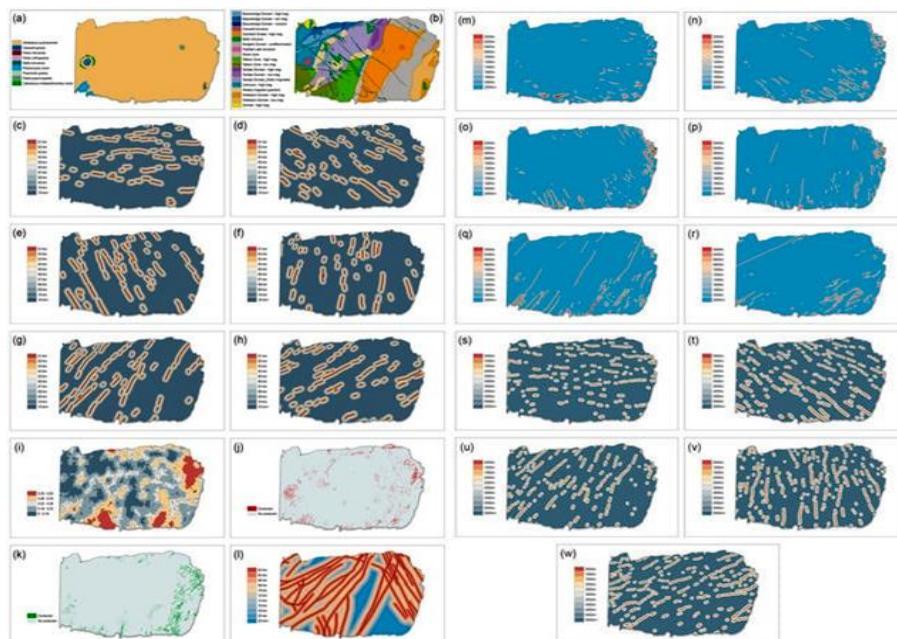


Рис. 5. Прогнозные критерии бассейна Атабаска: (a) геология, (b) магнитометрия Буферизованные: (c) гравитационные границы 6400 WNW, (d) гравитационные границы 6400 NW, (e) гравитационные границы 6400 NNW, (f) гравитационные границы 6400 NNE, (g) гравитационные границы 6400 NE, (h) гравитационные кромки 6400 ENE, (i) магнитная плотность границ 1600, (j) проводники—воздух, (k) проводники—земля, (l) разломы Etech IV, (m) разломы WNW, (n) разломы NW, (o) разломы NW, (p) разломы NNE, (q) разломы NE, (r) разломы ENE, (s) гравитационные кромки 1600 WNW, (t) гравитационные кромки 1600 NW, (u) гравитационные кромки 1600 NE, (v) гравитационные кромки 1600 NNE и (w) гравитационные кромки 1600 ENE.

Геологическая карта в масштабе 1: 250 000 была ограничена границей бассейна Атабаска и упрощена, включив девять обобщенных классов для геологического критерия. Для создания критериев вокруг аэро- и наземных электромагнитных проводников были построены буферы длиной 50 м – «Проводники (воздух)» и «Проводники (земля)». Как и в исследовании бассейна Макарура, разломы из набора данных были разделены на шесть классов ориентации, прежде чем были построены многокольцевые буферы. Набор магнитных данных классифицирует характеристики пород, обрамляющих бассейн и областей под группой Атабаска. Этот набор данных был привязан к границе исследуемой области для создания критерия «Магнитных доменов», который используется в качестве фактора перспективности фундамента. Разломы фундамента были использованы для представления крупномасштабных зон сквозного структурного развития. Широкие (10 × 2000 м буферные зоны), построенные вокруг этих объектов для создания критерия «разломов», отражают их большую площадь влияния и потенциал в качестве первичных каналов для глубинно циркулирующих металлоносных растворов фундамента.

Гравитационные и магнитные данные обрабатывались аналогично бассейну СЗ Макарура. Векторизованные выходные данные процедур обнаружения границ с фильтрами 1600 м и 6400 м были разделены на шесть классов ориентации, прежде чем вокруг каждого объекта были построены многокольцевые буферы. Они использовались в модели в качестве факторов скрытых каналов для растворов с потенциалом мелкого и более глубокого проникновения соответственно. Данные о магнитной интенсивности в бассейне Атабаска обрабатывались с помощью процедур обнаружения границ и фильтра 1600 м. Области высокой литологической/структурной сложности были очерчены с использованием функции линейной плотности с радиусом поиска 10 км по векторизованному результату для создания критерия – «Плотность магнитных границ 1600».

5. Пространственные взаимосвязи между оруденением урана и критериями его формирования.

5.1. Весомость доказательств

Принцип, лежащий в основе подхода "весомости доказательств" (WofE) при составлении карт минерального потенциала, заключается в том, что шансы найти месторождение в

пределах интересующей области изменяются в зависимости от наличия или отсутствия различных геологических параметров в пределах этой области, и что уровень влияния каждого фактора может быть оценен количественно. Методология включает в себя несколько этапов. Сначала исследуемая территория делится на элементарные ячейки и вычисляется вероятность обнаружения месторождения в любой из этих ячеек в отсутствие какой-либо дополнительной геологической информации. «Априорная вероятность» выражается через следующее уравнение:

$$P\{D\} = N\{D\}/N\{T\} \quad (1)$$

Априорная вероятность ($P\{D\}$) - это просто количество ячеек, содержащих оруденение ($N\{D\}$), деленное на общее количество ячеек ($N\{T\}$).

Следующий шаг - рассчитать, как изменяются шансы обнаружения месторождения из-за совокупного воздействия геологических особенностей в каждой ячейке. Теорема Байеса используется в логарифмически-линейной форме для количественной оценки пространственных связей между геологическими особенностями (т. е. доказательствами) и известными месторождениями/проявлениями. Степень пространственной ассоциации для каждого признака рассчитывается и выражается в терминах положительных и отрицательных весов доказательств для этого признака.

$$\text{Positive weight of evidence : } W_A^+ = \ln \frac{P\{A|D\}}{P\{A|\bar{D}\}} \quad (2)$$

где $P\{A|D\}$ является ли вероятность того, что клетка содержит признак A , учитывая наличие месторождения и $P\{A|\bar{D}\}$, - вероятность того, что клетка содержит признак A , учитывая отсутствие оруденения.

$$\text{Negative weight of evidence : } W_A^- = \ln \frac{P\{\bar{A}|D\}}{P\{\bar{A}|\bar{D}\}} \quad (3)$$

где $P\{\bar{A}|D\}$ является ли вероятность того, что клетка не содержит признака A , учитывая наличие месторождения и $P\{\bar{A}|\bar{D}\}$ является вероятностью того, что клетка не содержит признака A , учитывая отсутствие оруденения.

Положительные значения доказательств отражают увеличение шансов обнаружения месторождения при наличии определенного геологического элемента; отрицательные значения указывают на то, что наличие этого элемента уменьшает шансы обнаружения месторождения. Разница между этими значениями («контраст») означает чистую положительную или чистую отрицательную пространственную ассоциацию.

$$\text{Contrast} = (W_A^+) - (W_A^-) \quad (4)$$

‘Апостериорная вероятность’ - это предшествующая вероятность, измененная совокупным влиянием всех геологических особенностей в конкретном географическом местоположении:

$$P\{D|A_1, \dots, A_k\} = \frac{P\{D\} \cdot P\{A_1, \dots, A_k | D\}}{P\{A_1, \dots, A_k\}} = \frac{P\{D\} \cdot P\{A_1, \dots, A_k | D\}}{P\{D\} \cdot P\{A_1, \dots, A_k | D\} + P\{\bar{D}\} \cdot P\{A_1, \dots, A_k | \bar{D}\}} \quad (5)$$

Апостериорная вероятность для каждой ячейки - это вероятность того, что эта ячейка содержит месторождение, учитывая наличие набора геологических особенностей, и обеспечивает оценку перспективности на этом участке.

Для любых признаков, демонстрирующих статистически достоверную пространственную связь с распределением известных месторождений/проявлений, создаются взвешенные бинарные слои доказательств. Они растриваются и объединяются на заключительном этапе анализа WofE для создания сетки значений «апостериорной вероятности». Результирующая карта апостериорных вероятностей интерпретируется для отражения статистической вероятности присутствия оруденения в любой элементарной ячейке (или пикселе). *(Исчерпывающее изложение теории и деталей методологии "весомости доказательств" и ее применения к поискам ПИ можно найти в работах Бонэм-Картера и др., Агтерберга и др., Бонэм-Картера и Порвала и др.)*

Предпосылкой для значимого анализа весомости доказательств является то, что (1) обучаемая популяция (т.е. количество известных месторождений) в исследуемом районе сравнительно велика по сравнению с количеством неоткрытых месторождений, или, по крайней мере, должно быть сделано предположение, что известные месторождения генетически типичны и, следовательно, репрезентативны для всех месторождений в исследуемом районе; (2) район характеризуется высокой плотностью данных и (3) целевой стиль минерализации аналогичен тому, который используется в исследуемом обучающем районе. Заключительной важной предпосылкой является то, что доказательные слои не зависят от условий. Условная зависимость существует в случаях, когда (1) признаки представляют один и тот же критерий распознавания (например, одни и те же структуры могут быть представлены как в картографированных данных о разломах, так и в выходных данных геофизических процедур (обнаружения краев), (2) существует генетическая связь между критериями распознавания (например, зоны брекчий связаны с присутствием крупных структур) или (3) критерии могут быть получены на основе одних и тех же исходных данных (например, выходные данные из краевых процедур обнаружения выполняются с использованием фильтров с разной длиной волны), все зависит от местоположения оруденения.

В действительности предположение об условной независимости обычно в некоторой степени нарушается при составлении карты потенциала оруденения. Рудные тела и геологические особенности конкретной области обычно формировались и изменялись в связи с одними и теми же процессами в течение геологического времени, поэтому почти всегда существует некоторый уровень условной зависимости между геологическими особенностями в отношении местоположения месторождений. Цель, как правило, состоит в том, чтобы свести к минимуму степень нарушения путем тщательного выбора и разработки критериев, а также путем ограничения количества слоев доказательств, используемых в анализе.

Совокупный эффект объединения нескольких условно зависимых критериев может привести к чрезмерной представительности этих признаков в выходных данных WofE, поскольку индивидуально рассчитанный уровень влияния каждого признака добавляется к априорной вероятности на заключительном этапе анализа. Таким образом, накопленные веса множественных представлений одних и тех же признаков могут привести к предвзятому анализу, который смещен в сторону этих признаков.

Анализ весовых коэффициентов доказательств был сочтен в целом неуместным и непригодным как для исследований в СЗ бассейне Макарура, так и в бассейне Атабаска из-за относительно небольшого числа месторождений по сравнению с размером каждой области и высокого уровня условной зависимости между многими из свидетельствующих слоев (например, множественные критерии, полученные на основе одних и тех же геофизических данных; критерии, представляющие проводники, полученные на основе как аэро-, так и наземных съемок; множественные представления разломов, геофизических границ и т.д.). Однако первый этап исследования анализ WofE оказался полезным для проверки степени пространственной связи между известными месторождениями урана и отдельными объектами и, в частности, для проведения первичного статистического анализа относительной важности различных типов структур в региональном масштабе. Полученные статистически уровни влияния давали важные подсказки относительно пространственной (и возможной генетической) связи признаков с минерализацией урана и использовались для обоснования решений экспертов, когда дело доходило до ручного присвоения весов признакам и картам для нечеткого логического анализа. Анализ WofE был выполнен с использованием инструментов моделирования пространственных данных в ArcGIS 10.2.1. и дополнение ArcSDM.

Сводные данные по значимым расчетным весам представлены в таблице 3 для СЗ бассейна Макарур и в таблице 4 для бассейна Атабаска.

Рассчитанные веса доказательств для бассейна С3 Макарутур.

Predictor Map	Criterion	W+	W-	Contrast	Student Value
Simplified lithology	Carbonaceous sediments	3.32	-0.06	3.38	12.22
	Felsic volcanics	0.73	-0.02	0.75	2.42
	Gneiss	0.89	-0.09	0.98	5.13
	Haematitic breccia	4.53	-0.01	4.54	6.94
	Sandstone	-0.65	0.14	-0.79	-4.03
	Schist	0.83	-0.15	0.97	6.29
Simplified stratigraphy	Archean	0.89	-0.07	0.95	4.50
	Proterozoic	0.05	-0.33	0.38	1.82
Metamorphic regions	Amphibolite facies	1.06	-0.27	1.34	9.67
	Granulite facies	1.56	-0.01	1.57	2.20
	Lower greenschist facies	2.06	-0.10	2.16	10.10
	Sub greenschist facies	0.29	-0.09	0.38	2.65
	Unmetamorphosed cover	-1.37	0.59	-1.96	-10.34
	Upper greenschist facies	0.46	-0.02	0.48	1.81
Archean buffered	05 km	1.46	-0.42	1.89	14.33
Gravity 6400 buffered	20 km	0.00	-4.01	4.02	0.40
Faults WNW buffered	1 km	1.60	-0.20	1.79	11.39
Faults NW buffered	1 km	1.34	-0.29	1.64	11.76
Faults NNW buffered	2 km	1.09	-0.40	1.49	11.41
Faults NNE buffered	1 km	1.09	-0.12	1.21	6.90
Faults NE buffered	1 km	1.31	-0.15	1.46	8.62
Faults ENE buffered	1 km	1.17	-0.10	1.26	6.53
Gravity 1600 NNE buffered	9 km	0.10	-0.42	0.51	2.87
Gravity 1600 NE buffered	6 km	0.17	-0.25	0.42	3.07
Magnetics 1600 edge density	0.21-0.24	0.31	-0.07	0.38	2.41
	0.24-0.3	0.43	-0.17	0.60	4.41
	0.3 +	0.21	-0.05	0.26	1.66
Unconformity buffered	45 km	0.12	-1.71	1.83	4.43

Табл. 4.

Рассчитанные веса доказательств для бассейна Атабаска с использованием проявлений урана в качестве обучающего набора.

Predictor Map	Criterion	W+	W-	Contrast	Student Value
Solid geology	Athabasca quartzarenite	-0.07	1.57	-1.64	0.22
	Carswell gneiss	3.83	-0.07	3.91	0.26
Magnetic domains	Carswell structure	3.19	-0.09	3.28	14.47
	Mudjatic—undifferentiated	0.73	-0.24	0.97	7.40
	Shear zone	0.33	-0.01	0.34	0.89
	Tantato—low mag	0.76	-0.04	0.79	3.15
	Wollaston—high mag	1.68	-0.07	1.75	7.80
	Wollaston—low mag	1.51	-0.23	1.74	12.09
Gravity 6400 WNW buffered	02 km	0.68	-0.06	0.73	3.58
Gravity 6400 NNE buffered	01 km	0.43	-0.01	0.44	1.21
Gravity 6400 EN buffered	01 km	0.52	-0.02	0.54	1.81
Magnetics 1600 edge density	0.26-0.33	0.33	-0.09	0.41	2.88
	0.33-0.52	1.44	-0.28	1.72	12.72
Conductors (air)	Conductor	2.88	-0.13	3.01	15.96
Conductors (ground)	Conductor	3.58	-0.32	3.90	27.07
Extech IV faults	10 km	0.06	-0.21	0.27	1.76
Faults WNW buffered	2000 m	1.20	-0.12	1.32	7.74
Faults NW buffered	400 m	1.82	-0.09	1.91	9.14
Faults NNW buffered	200 m	1.77	-0.05	1.81	6.53
Faults NNE buffered	2000 m	1.62	-0.34	1.96	14.95
Faults NE buffered	200 m	1.56	-0.04	1.60	5.59
Faults ENE buffered	400 m	1.26	-0.03	1.29	4.34
Gravity 1600 WNW buffered	3500 m	0.44	-0.10	0.54	3.66
Gravity 1600 NW buffered	4500 m	0.17	-0.08	0.25	1.92
Gravity 1600 NE buffered	3000 m	0.17	-0.03	0.20	1.18
Gravity 1600 ENE buffered	5000 m	0.15	-0.09	0.23	1.84

Для много классовых критериев показаны только признаки, которые вернули значительные контрасты. Там, где вокруг объектов использовались многокольцевые буферы, показан буфер с наибольшим контрастом. W_{+} = положительный вес доказательств, W_{-} = отрицательный вес доказательств. Контраст - это разница между положительным и отрицательным весами. Положительный или отрицательный контраст означает чистую положительную или чистую отрицательную пространственную ассоциацию соответственно. Более высокие значения контраста подчеркиваются более теплыми цветами (от оранжевого до красного), а отрицательные значения контраста выделяются более холодными цветами (синим). Значение Стьюдента является приблизительным « t -критерием Стьюдента» и обеспечивает меру статистической достоверности контраста. Значение по Стьюденту «2» соответствует 98%-му уровню достоверности рассчитанного контраста; значение по Стьюденту «1» соответствует 85%-му уровню достоверности.

Положительные значения контраста указывают на геологические особенности, которые оказывают общее положительное влияние на распределение урановой минерализации. Более высокие контрасты (подчеркнутые более теплым (оранжево-красным) оттенком в таблицах весов) предполагают больший эффект. Значительные отрицательные значения контраста (т.е. $< -0,75$) интерпретируются как указывающие на те геологические характеристики, которые оказывают негативное влияние на распределение месторождений (т.е. особенности, которых следует избегать при целенаправленных поисках). Все на уровне достоверности, указанном значением Стьюдента.

Для много классовых объектов (например, геология, магнитные данные, метаморфические регионы и т.д.) показаны только объекты, которые вернули значительные контрасты. Эти характеристики перечислены в поле «Критерий». Многокольцевые буферы обрабатываются «кумулятивно по возрастанию». Статистический расчет весов выполняется таким образом, что большие буферные зоны включают меньшие. Это позволяет определить, на каком расстоянии от объекта пространственная связь с известными проявлениями перестает увеличиваться и начинает уменьшаться. Это критическое расстояние указано в качестве «Критерия» в таблицах весов.

5.1.1 СЗ бассейн Макарура.

Высокая перспективность как углеродистых отложений, так и гематитовых брекчий отражена в исключительно высоких значениях контраста, рассчитанных для этих литологических единиц (3,38 и 4,54 соответственно). Однако ограниченная пространственная протяженность этих единиц, которые обычно наносятся на карту вокруг областей с известной минерализацией (в первую очередь для гематитовой брекчии), возможно, преувеличивает их значение и учитывая, что, вероятно, такие единицы присутствуют в других областях, где

геология плохо известна. Заметные положительные значения были также рассчитаны для стратиграфии архея (0,95) и гнейса (0,98; из-за присутствия многочисленных мелких залежей урана, расположенных в пределах архейских гнейсовых комплексов), протерозойских образований (0,38) и сланцев (0,98; сланец Кэхилл является наиболее важным литологическим вмещающим элементом на урановом месторождении Аллигатор-Риверс) и кислых вулканов (0,75), которые являются вмещающими элементами для многочисленных незначительных залежей на урановом месторождении Саут-Аллигатор-Риверс. Получены значительные отрицательные значения для песчаника (-0,79) и неметаморфизованного чехла (-1,96), что отражает отсутствие проявлений урана на сегодняшний день ниже песчаников, заполняющих неопротерозойский бассейн. Относительно высокий контраст, рассчитанный для гранулитовой метаморфической фации (1,57) вероятно, является результатом статистической аномальности, поскольку в этом пространственно ограниченном блоке всего две относительно незначительные залежи урана. Напротив, 79 залежей урана находятся в пределах области картографированного метаморфизма амфиболитового типа, но большая площадь приводит к несколько более низкому расчетному контрасту (1,34). Значения положительного контраста были также рассчитаны для близости к нанесенным на карту архейским комплексам (1,89), при этом 5 км были критическим буферным расстоянием.

Объединенные геофизические границы с буферизацией гравитации 6400 получили второй по величине расчетный контраст (4,02), но низкое значение Стьюдента отражает очень низкую степень статистической достоверности результата. Относительно высокие значения контраста были рассчитаны для всех нанесенных на карту классов ориентации разломов, при этом предпочтение отдавалось классам WNW (1,79), NW (1,64), NNW (1,49) и NE (1,46). Гравитация 1600 н.э. (0,42) и NNE (0,51) показали умеренные контрасты, как и критерий граничной плотности Magnetics 1600, особенно умеренный (0,24–0,3 км/км²) класс плотности (0,60). Близость к несогласию (буферизованному несогласию) также определена как важный прогностический фактор, критическим буферным расстоянием является 45 км (1,83).

5.1.2. Бассейн Атабаска.

Значение высокой контрастности, полученное для карсуэллского гнейса (3,90), и сильно отрицательное значение, рассчитанное для кварцаренита Атабаска (-1,64), статистически недостоверны, на что указывают чрезвычайно низкие значения по Стьюденту. Они также несколько противоречат интуиции, учитывая установленную родословную осадочных образований, заполняющих бассейн, и их очевидную перспективность для урана, связанного с несоответствием. Неожиданно полученные результаты свидетельствуют о том, что лучшим местом для поиска урана типа несогласия в бассейне реки Атабаска является Карсвелл-гнейс и что следует избегать района, покрытого кварцаренитами Атабаски. Эти нереалистичные и

статистически неверные результаты снова объясняются проблемой масштаба и небольшим набором обучающих данных относительно размера исследуемой территории. В карсуэллском гнейсе (общая площадь 134 км²) содержится всего 21 известное месторождение, тогда как в кварцарените Атабаска (72 600 км²) - 271. Однако разница в площади приводит к тому, что кварцаренит Атабаски отвергается в качестве объекта поисков в этом чисто статистическом анализе. Ни одна другая литологическая единица не показала достоверной пространственной связи с урановой минерализацией. Структура Карсвелла показала самый высокий контраст (3,28) магнитных доменов, относительно высокое значение которого, также связано с проблемой масштаба. Из оставшихся магнитных доменов только домен Муджатик (0,97), домен Тантато с низким значением (0,79), Домен Волластон с высоким значением (1,75), домен Волластон с низким значением (1,74) и зоны сдвига (0,34) демонстрируют достоверные пространственные ассоциации с урановой минерализацией. Как «аэро» (3.01), так и «наземные» проводники (3.90) демонстрируют высокие значения контрастности.

Определение того, какие ориентации линейных объектов демонстрируют сильную пространственную связь с минерализацией урана, представляло первостепенный интерес в этом анализе. Все нанесенные на карту (в масштабе 1:250 000) разломы показали значительные контрастные значения с предпочтительными классами ориентации NW (1,91), NNW (1,81), NNE (1,96) и NE (1,60). Были определены скромные значения контраста для классов ориентации краев Gravity 6400 WNW (0,73), NNE (0,44) и ENE (0,54). Более высокочастотные классы Gravity 1600 edge также дали относительно скромные значения контраста для классов ориентации WNW (0,54), NW (0,25), NE (0,20) и ENE (0,23). Класс объектов с плотностью границ Magnetics 1600 демонстрирует относительно высокое значение контрастности, при этом предпочтение отдается классу с высокой плотностью (0,33–0,52 км/км²) (1,72).

Весы, полученные в результате анализа WofE, высвечивают ряд проблем, связанных с использованием методологий MPM, основанных на данных, в недостаточно изученных районах. Ограничения возникают из-за сравнительно небольшого числа известных месторождений по сравнению с размером района поиска. Например, бассейн Атабаска занимает площадь примерно 460 на 220 км; учитывая размер целевой территории, общее количество известных месторождений урана (<50) чрезвычайно мало. Это потребовало использования показателя «встречаемости урана» для создания обучающего набора достаточного размера для получения статистически достоверных значений контраста. Следует отметить, что, хотя набор обучающих данных по встречаемости обеспечивает более статистически достоверный результат, плотность данных все еще довольно низкая, и точки данных обычно группируются вокруг районов исторических открытий. Еще одним

недостатком этого подхода является то, что данные о залежах включают все - от небольших радиометрических и геохимических аномалий, незначительных перехватов буровых скважин, радиоактивных валунов до мелких и крупных месторождений. В этом контексте результаты следует интерпретировать как отражающие залегание, а не потенциал месторождения, что не обязательно является прогнозным критерием. Несмотря на эти ограничения и с должным учетом недостатков метода, анализ WofE дал информативные результаты для обеих областей исследования.

5.2. Присвоение нечетких весов.

В отличие от теории нулевых множеств, которая определяет принадлежность к множеству либо как 1, либо как 0 (т. е. истинно или ложно), теория нечетких множеств допускает континуум степеней принадлежности от 0 до 1. Применение теории нечетких множеств в fuzzy logic MPM позволяет создавать модели, способные представлять расплывчатые, субъективные показатели перспективности. Значения «нечеткой принадлежности» могут быть присвоены критериям в соответствии с различными кривыми функции принадлежности или вручную, в соответствии с геологическими знаниями.

Использовался относительно простой подход для присвоения числовых весов (т.е. значений «нечеткой принадлежности»). Каждой критерию был присвоен вес от 1 до 10, причем более высокие значения отражали большую важность критериев распознавания в модели минерализации и/или большую достоверность данных, на основе которых был получен слой. Веса применяются одинаково ко всем классам в пределах одного и того же критерия. Отдельным признакам был присвоен «вес класса» (также со значениями от 1 до 10), отражающий относительную перспективность в рамках критерия.

Далее была привлечена группа экспертов, которые руководствовались всесторонним обзором опубликованных работ, статистическими данными из weights of evidence (WofE) и другими подходами (например, анализ Fry), а также собственным опытом.

Оценки класса и веса были перемножены и разделены на 100, чтобы получить значение «нечеткой принадлежности» (т. е. от 0 до 1) для каждого объекта. Чтобы избежать любых нежелательных и нереалистичных эффектов при выполнении операций нечеткой логики, вычисленные значения нечеткой принадлежности, равные нулю, были заменены на очень низкое значение (т.е. 0,001) там, где они имели место. Нечеткое значение принадлежности можно рассматривать как меру воспринимаемой важности каждого признака в модели минерализации. Каждый взвешенный критерий сконструирован и взвешен таким образом, что его можно рассматривать как однокомпонентную карту перспективности.

Там, где близость к определенному признаку считается желательной в модели, используются буферы с несколькими кольцами, при этом наименьшему буферу обычно

присваивается наивысший вес класса. Уменьшение значений для последующих и, следовательно, более крупных буферов отражает уменьшение перспективности с увеличением расстояния от объекта. Эта методология использовалась для определения критерия с буферизацией зоны несогласия в СЗ бассейне Макартур, но в этом случае району, помеченному как "выше зоны несогласия" был присвоен наивысший вес класса (в дополнение к наименьшему буферу), поскольку само несогласие является основной поисковой целью. В отличие от этого, признакам, которые были буферизованы для получения архейского буферного критерия, был присвоен низкий вес класса, поскольку считается, что наиболее перспективные районы находятся в протерозойских метаосадках, прилегающих к архейским куполам, а не к самим архейским куполам.

Критериям на прогнозных картах- с несколькими классами (например, литология, стратиграфия и т.д.) присваиваются значения класса от 0 до 10 в соответствии с их предполагаемой важностью в модели минерализации. При интерпретации весовых коэффициентов классов, присвоенных различным объектам, следует иметь в виду, что критерии являются двумерными представлениями трехмерной Земли, и в этом контексте иногда необходимо применять вес к объекту, который выше, чем можно было бы ожидать, если бы объект рассматривался изолированно. Например, породы фанерозойского возраста в бассейне Макартура считаются неперспективными с точки зрения их потенциального вмещения урановой минерализации типа несогласия. Однако на перспективность ячейки, расположенной над этими единицами, влияет тот факт, что весьма перспективные протерозойские породы, скорее всего, расположены на относительно небольшой глубине под обычно тонким фанерозойским покровом. По этой причине стратиграфический класс фанерозоя получает относительно высокий вес класса 7 в этой модели, несмотря на то, что сам по себе является плохой поисковой целью.

Полная информация, включая веса классов, представлена в таблицах 4 и 5.

Веса на карте МРМ бассейна СЗ Макартур.

Derived Predictor Maps	Map Weight	Comments
Simplified lithology	8	Strong conceptual control and highlighted by WofE analysis.
Simplified stratigraphy	8	Strong conceptual control and highlighted by WofE analysis.
Archean buffered	9	Very important conceptually and highlighted by WofE analysis.
Unconformity buffered	9	Critical control on mineralisation but with a large zone of influence, as supported by WofE.
Faults WNW buffered	9	Dominant trend highlighted by WofE (occurrences and deposits).
Faults NW buffered	8	Highlighted by WofE (occurrences) and dominant in Fry 1 km to 50 km analysis (occurrences and deposits).
Faults NNW buffered	5	Highlighted by WofE (occurrences) and strong trend in Fry 1 km to 50 km analysis (occurrences and deposits).
Faults NNE buffered	5	Relatively weak trend highlighted by Fry analysis, weak trend in WofE analysis.
Faults NE buffered	8	Strong trend in WofE analysis (occurrences and deposits).
Faults ENE buffered	7	Highlighted in WofE analysis (strong in deposits only data).
Metamorphic regions	4	Weak predictor of U mineralisation. Little differentiation between metamorphic classes in WofE.
Gravity 1600 NNE buffered	3	Weak trend highlighted by WofE analysis (occurrences data).
Gravity 1600 NE buffered	5	Relatively weak trend in WofE analysis (deposits and occurrences).
Gravity 6400 buffered	6	Strong contrast returned from WofE analysis. Conceptually important.
Magnetics 1600 edge density	5	Modest response from WofE analysis. Conceptually important.

Табл. 5.

Веса на карте МРМ бассейна Атабаски.

Derived Predictor Maps	Map Weight	Comments
Solid geology	9	Conceptually strong control on mineralisation.
Conductors (air)	7	Strong response from WofE analysis. Important in historical targeting.
Conductors (ground)	8	Very strong response from WofE. Important in historical targeting.
Faults WNW buffered	6	Clear spatial association with known deposits. Highlighted by WofE.
Faults NW buffered	7	Clear spatial association with known deposits. Highlighted by WofE.
Faults NNW buffered	6	Clear spatial association with known deposits. Highlighted by WofE.
Faults NNE buffered	7	Clear spatial association with known deposits. Highlighted by WofE.
Faults NE buffered	8	Clear spatial association with known deposits. Highlighted by WofE.
Faults ENE buffered	6	Weaker response from WofE. Still important conceptually.
Magnetic domains	10	Representation of basement domains—critical control on U mineralisation.
Extech IV faults	4	Broad zones of structural weakness with high levels of spatial uncertainty.
Gravity 1600 WNW buffered	4	Weak spatial association with known deposits in WofE analysis.
Gravity 1600 NW buffered	3	Very weak response from WofE.
Gravity 1600 NE buffered	5	Important conceptually. Weak spatial association with known deposits.
Gravity 1600 ENE buffered	3	Important conceptually. Weak spatial association with known deposits.
Gravity 6400 WNW buffered	6	Moderate response from WofE analysis. Possibly represent significant basement structures.
Gravity 6400 NW buffered	3	No spatial association observed in WofE analysis but conceptually important.
Gravity 6400 NNW buffered	4	No spatial association observed in WofE analysis but conceptually significant.
Gravity 6400 NNE buffered	5	Moderate response from WofE analysis. Possibly represent significant basement structures.
Gravity 6400 NE buffered	2	No spatial association observed in WofE analysis but conceptually significant.
Gravity 6400 ENE buffered	6	Moderate response from WofE analysis. Possibly

Весы отражают воспринимаемую важность критериев распознавания в модели минерализации и / или большую достоверность данных, на основе которых был получен слой.

Векторные прогнозные карты- были преобразованы в числовые растровые сетки с использованием значения нечеткой принадлежности. Размеры растровых ячеек (т.е. пикселей) размером 50 м и 100 м использовались для MPMS СЗ бассейна Макартур и бассейна Атабаска соответственно. Затем для объединения слоев использовались математические операции нечеткой логики.

5.3. Комбинирование прогнозных критериев и признаков.

Сеть вывода, состоящая из взвешенных критериев и объединяющих их математических операторов, сформирована таким образом, чтобы ее можно было использовать с применением различных операций нечеткой логики:

$$\text{Fuzzy AND : } \mu_{AND} = \text{Min} (\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots, \mu_n) \quad (6)$$

где μ_{AND} - выходной нечеткий показатель, а μ_x - значения нечеткой принадлежности для выровненных ячеек раstra в местоположении в критериях 1, 2, 3 и т.д. Результирующая нечеткая оценка представляет собой минимальное значение всех входных данных для каждой выровненной ячейки раstra.

$$\text{Fuzzy OR : } \mu_{OR} = \text{Max} (\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots, \mu_n) \quad (7)$$

где μ_{OR} - выходной нечеткий показатель, а μ_x - значения нечеткой принадлежности для выровненных ячеек раstra в местоположении в критериях 1, 2, 3 и т.д. Результирующая нечеткая оценка представляет собой максимальное значение всех входных данных для каждой выровненной ячейки раstra.

$$\text{Fuzzy ALGEBRAIC PRODUCT : } \mu_{AP} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (8)$$

где μ_{AP} - выходной нечеткий показатель, а μ_i - значения нечеткой принадлежности для выровненных ячеек раstra в определенном месте в критериях ($i = 1, 2, \dots, n$). Значения принадлежности из каждого входного сигнала умножаются. Результат всегда меньше или равен наименьшему значению принадлежности, поскольку входные значения находятся в диапазоне от нуля до единицы.

$$\text{Fuzzy ALGEBRAIC SUM : } \mu_{AS} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (9)$$

где μ_{AS} - выходной нечеткий показатель, а μ_i - значения нечеткой принадлежности для выровненных ячеек раstra в определенном месте в критериях ($i = 1, 2, \dots, n$). Это не алгебраическая сумма. Результат всегда больше (или равен) наибольшему значению членства, вносящего вклад, но никогда не больше единицы.

$$\text{Fuzzy GAMMA} : \mu_{\text{GAMMA}} = [\mu_{\text{AS}}]^{\gamma} \times [\mu_{\text{AP}}]^{(1-\gamma)} = \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{\gamma} \times \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^{(1-\gamma)} \quad (10)$$

где μ_{GAMMA} - выходной нечеткий показатель, а μ_i - значения нечеткой принадлежности для выровненных ячеек раstra в определенном месте в критериях ($i = 1, 2, \dots, n$). Нечеткая ГАММА представляет собой комбинацию нечеткой алгебраической суммы и нечеткого алгебраического произведения. Значение гамма может варьироваться (т. е. между 0 и 1) для регулирования общего 'повышенного' эффекта первого и «пониженного» эффекта последнего, так что выходные данные могут быть «настроены» в соответствии с конкретной концептуальной моделью.

Важно отметить, что при использовании операций Fuzzy AND или Fuzzy OR нечеткая принадлежность к одному элементу доказательств управляет выходным значением (т. е. выходным значением является наименьшее или наибольшее значение из всех входных данных). И наоборот, нечеткие значения принадлежности всех входных данных влияют на выходные данные операторов нечеткого произведения, нечеткой суммы и нечеткой ГАММЫ.

Сети вывода, построенные для MPMS нечеткой логики СЗ бассейна Макартур и бассейна Атабаска, показаны на рисунках 6 и 7 соответственно.

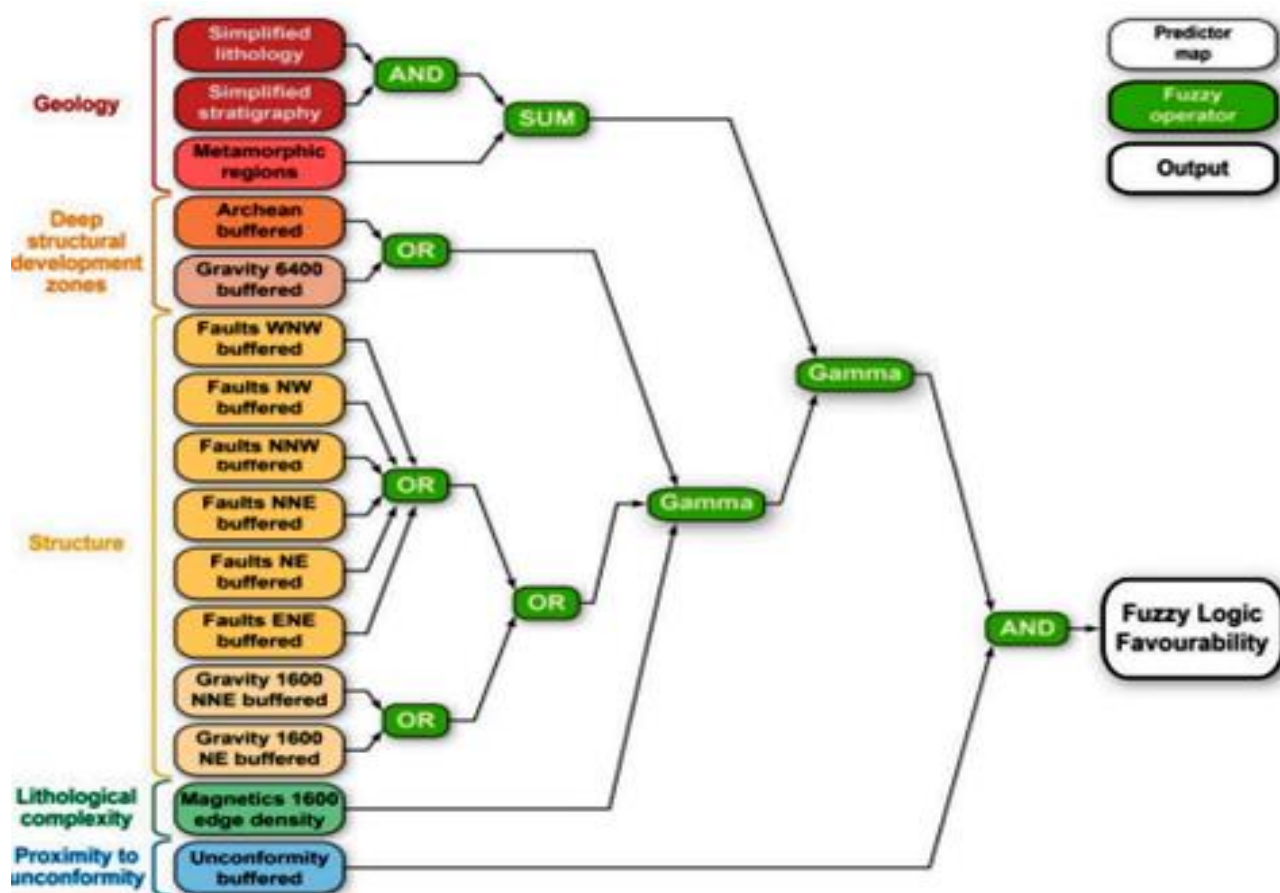


Рис. 6. Сеть выводов СЗ бассейна Макартур.

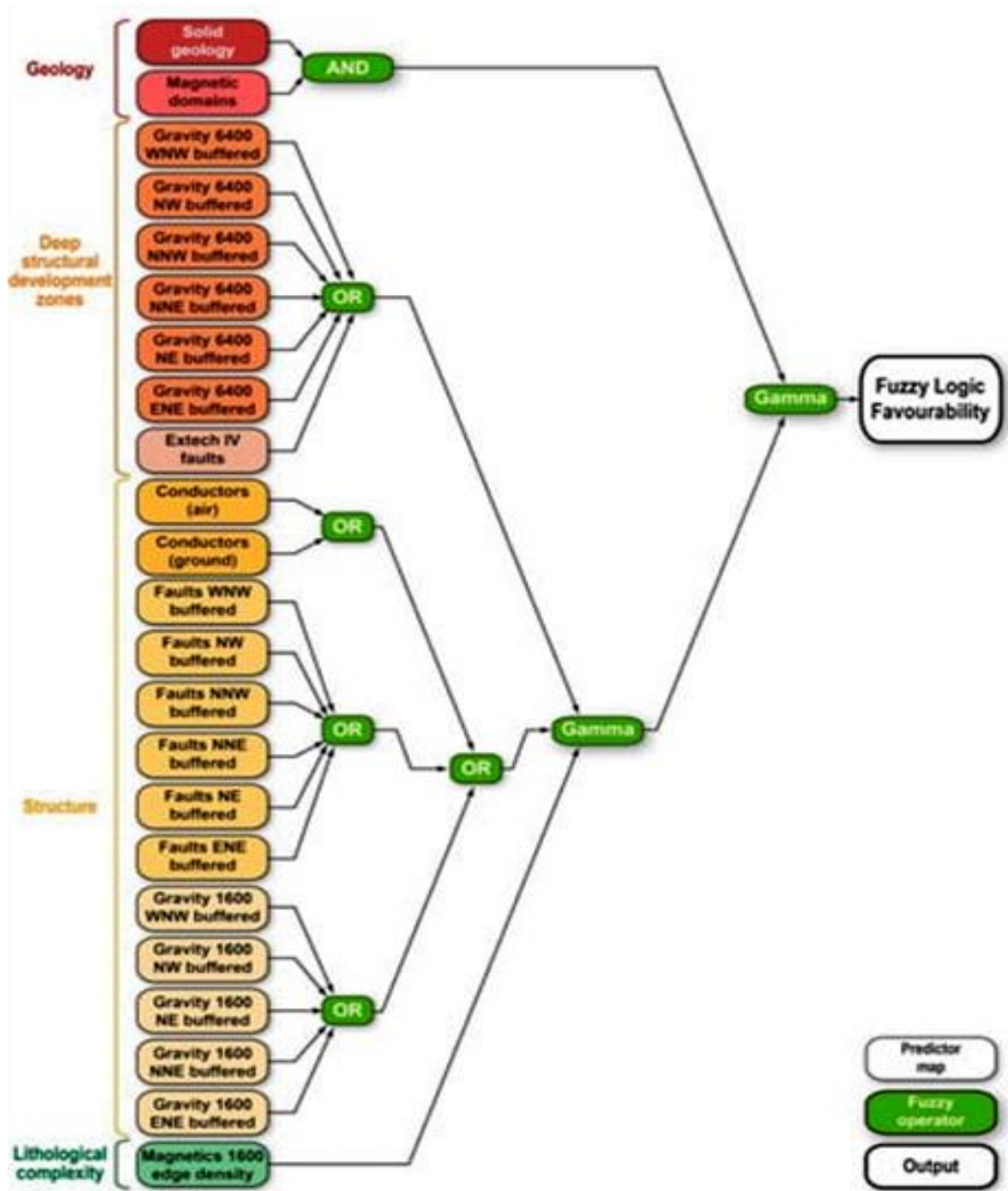


Рис. 7. Сеть выводов бассейна реки Атабаска.

Карты критериев сгруппированы на основе класса критериев распознавания. Операции нечеткой логики используются для объединения взвешенных и растрованных критериев с помощью серии промежуточных шагов для получения окончательной прогнозной карты.

Критерии, представляющие различные аспекты одного и того же класса распознавания, сначала комбинируются операциями Fuzzy AND или Fuzzy OR. Использование этих операций на ранних стадиях сети вывода эффективно уменьшает потенциальные проблемы с условной зависимостью, поскольку выходные данные для любой конкретной ячейки зависят только от одного из входных данных (т. е. наименьшего или наибольшего значения соответственно).

Выбор операций Fuzzy AND/или Fuzzy OR зависит от того, должно ли присутствие признаков с высоким значением нечеткой принадлежности быть представлено в определенном месте для всех или для любого из комбинируемых критериев. В СЗ бассейна Макарура критерии упрощенной литологии и упрощенной стратиграфии объединены с использованием нечеткого оператора AND, отражающего необходимость того, чтобы потенциальные вмещающие породы были подходящего типа и возраста для конкретного местоположения, которое можно считать перспективным. И наоборот, взвешенные критерии разломов объединяются на первом этапе обеих моделей с нечетким оператором OR. Нечеткая оценка, полученная для конкретной ячейки в этом случае, является наивысшим значением нечеткой принадлежности к любому из входных данных в этом местоположении. Логика заключается в том, что при рассмотрении только разломов в качестве потенциальных факторов, влияющих на перспективность, близость к любому разлому хороша, но перспективность в любой точке хороша настолько, насколько хорош уровень влияния, исходящий от наиболее благоприятного критерия. Выходное значение в любой точке зависит от различных весовых коэффициентов карты, применяемых к различным классам структурной ориентации, и близости к ближайшей структуре.

Нечеткие гамма-операторы используются на более поздних этапах сети вывода для объединения промежуточных растров, представляющих различные классы критериев распознавания. Итоговый эффект оператора нечеткой гаммы заключается в том, что высокие значения во всех входных данных приводят к высоким значениям на выходе. В этих моделях используется вывод о том, что для того, чтобы клетка считалась перспективной, требуется некоторая комбинация представителей из каждого класса критериев распознавания. Модель СЗ бассейна Макарур включает дополнительное и окончательное требование о том, что ячейка должна располагаться на подходящем расстоянии от зоны несогласия или в области, где несогласие скрыто чехлом бассейна. Этот дополнительный контроль не является необходимым для модели бассейна Атабаска, поскольку область МРМ ограничена границами осадочного бассейна.

Прогнозные карты для СЗ бассейна Макарур и бассейна Атабаска, полученные в результате сочетания всех взвешенных и обработанных исходных данных и определенные сетями вывода, показаны на рисунках 8 и 9.

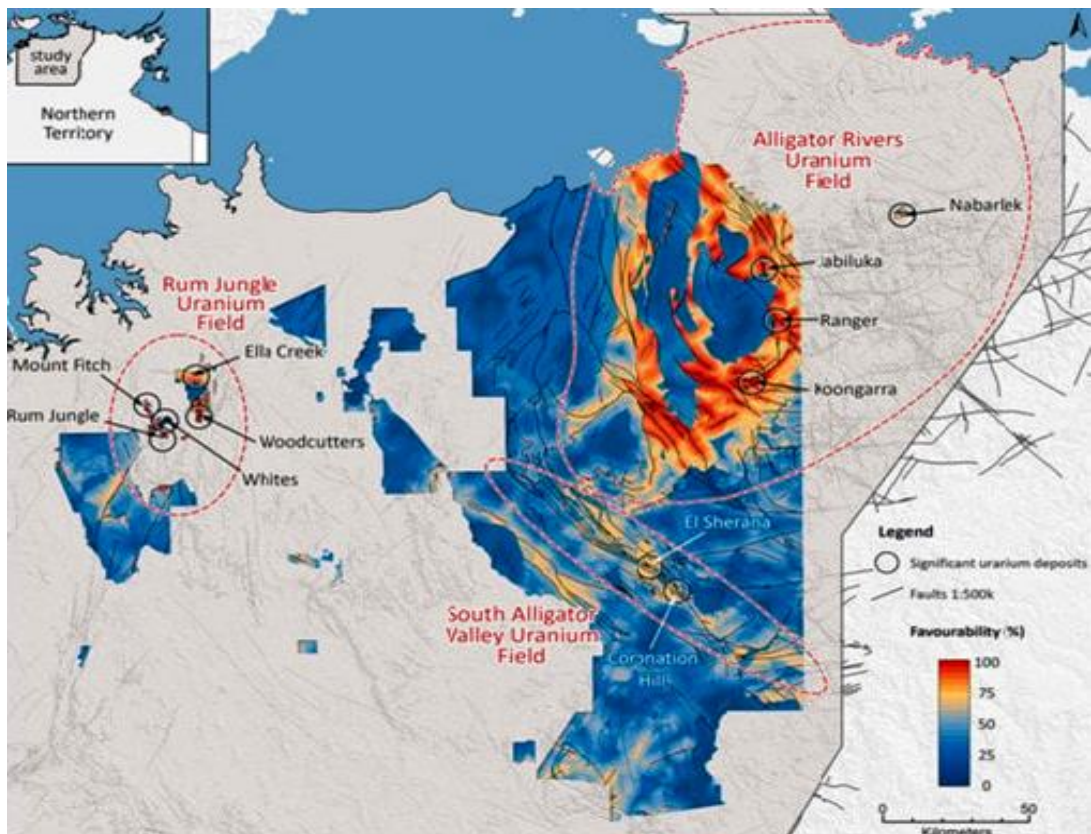


Рис. 8. Результат нечеткого логического моделирования минерального потенциала урана «типа несогласия» в СЗ бассейне Макарура.

Более теплые цвета (от оранжевого до красного) представляют повышенную перспективность. Местоположения урановых месторождений, связанных с несогласием, показаны черными кругами, а общая тенденция урановых месторождений в Рам Джанглиз, Аллигатор Риверс и Саут Аллигатор Риверс очерчена красными пунктирными линиями.

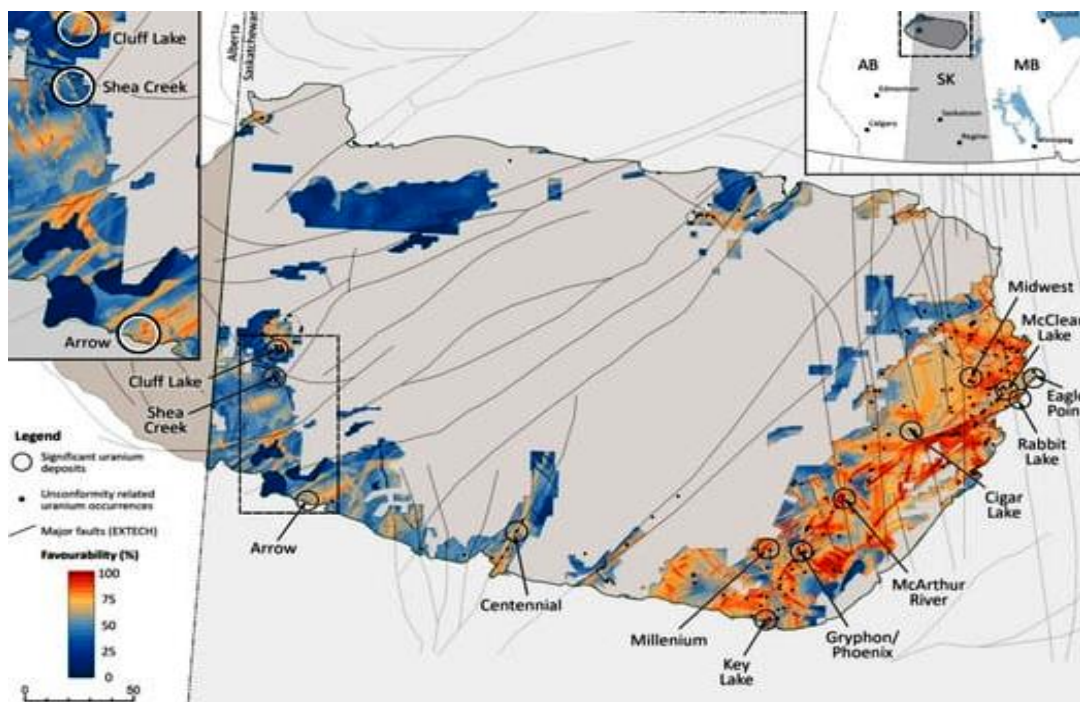


Рис. 9. Результат нечеткого логического моделирования минерального потенциала бассейна Атабаска для урана «типа несогласия».

Более теплые цвета (от оранжевого до красного) представляют повышенную перспективность. Местоположения значительных месторождений урана, связанных с несоответствием, показаны черными кружками. Из-за частного характера исследования показаны только результаты из областей, покрытых активными месторождениями полезных ископаемых.

5.4. Источники статистической аномальности в МРМ.

Статистические аномалии могут возникать в случаях, когда даже несколько известных месторождений/проявлений расположены в пределах относительно небольшого участка. Более высокая плотность заселенных клеток в пределах этой площади значительно повышает статистическую вероятность обнаружения там месторождения в соответствии с анализом WofE. Это может действительно отражать ее повышенную перспективность или, в некоторой степени, быть результатом увеличения исторических исследований в этой области. Смещение в сторону исторических районов поисков и открытия является неизбежным следствием общего повышения уровня ГРР, проводимых здесь. Например, в СЗ бассейне Макартур гематитовые брекчии нанесены на карту очень подробно вокруг нескольких известных месторождений из-за их очевидного значения в качестве индикаторов гидротермальной активности и возможной минерализации. Однако их трудно обнаружить, и маловероятно, что они будут зарегистрированы в районах, в которые никогда не проводилось бурение. Аналогичным образом, складки и разломы обычно наносятся на карту и прослеживаются в мельчайших деталях вокруг областей с известной минерализацией, но могут оставаться нераспознанными и неучтенными в других местах. В бассейне Атабаска исследования ЭМ (особенно наземные исследования) исторически были сосредоточены вокруг районов с месторождениями. В результате электромагнитные проводники (особенно высокоперспективные «наземные» проводники) в значительной степени ограничены областями известной минерализации, где проводились такие исследования. Такого рода «историческое смещение внимания» (т.е. преимущественный сбор данных вокруг районов с известной минерализацией), несомненно, приводит к тому, что некоторые особенности чрезмерно подчеркиваются в чисто статистических анализах, особенно в тех, которые проводятся в региональном (или более крупном) масштабе. Дихотомия внимания к поискам еще более преувеличена между зонами обнаженного фундамента и зонами, находящимися под значительным покровом, о чем свидетельствует полное отсутствие зарегистрированных залежей урана в пределах исследуемой части СЗ бассейна Макартур, покрытой протерозойским песчаником. Концентрации урана, несомненно, должны существовать в подстилающих породах фундамента, но поскольку эти скрытые залежи очень трудно

обнаружить, набор поисковых критериев и признаков в настоящее время ограничен участками обнаженного фундамента или очень мелким покровом.

Другим важным фактором, который следует учитывать в недостаточно разведанных районах, является то, что результаты анализа WofE обычно «подтверждают» или соответствуют историческим моделям разведки. Исторические модели минерализации стимулируют разведку, приводя к большему количеству открытий тех, которые соответствуют этой конкретной модели. На недостаточно изученных территориях это потенциально приводит к использованию неполной или ошибочной модели. Ключевой вопрос заключается в следующем: действительно ли известные месторождения являются репрезентативными для всех месторождений, включая те, которые еще предстоит открыть? Недавние открытия за пределами нынешней границы бассейна Атабаска, которые не совсем соответствуют историческим моделям разведки (Arrow, Triple R—Patterson Lake South) и последовавшая за этим "спешка" в поисках аналогов иллюстрируют тот факт, что новые открытия могут привести к модификации преобладающей целевой модели и оценке нового пространства поисков. Это приводит к дальнейшим открытиям, которые, в свою очередь, укрепляют новую парадигму разведки.

5.5. Объективное определение структуры.

Геофизические элементы обычно демонстрируют слабую статистическую пространственную связь с известной минерализацией урана как для СЗ бассейна Макатур, так и для бассейна Атабаска. Возможно, минерализация урана в обоих бассейнах связана со структурами, которые не обязательно демонстрируют сильные геофизические градиенты, или, возможно, используемые здесь процедуры обнаружения слишком чувствительны к градиентам, которые могут представлять или не представлять значительные структуры. В качестве альтернативы, разумно предположить, что количество обнаруженных месторождений в каждом районе относительно невелико по сравнению с количеством неоткрытых месторождений и что известные месторождения преимущественно сосредоточены в районах, которые исторически было относительно легко исследовать (например, участки обнаженного фундамента, участки с относительно неглубоким покровом и районы, не подверженные жестким ограничениям доступа). Наземные исследования всех видов чаще всего проводятся в этих районах и, как уже было предложено, имеют тенденцию быть особенно сосредоточенными вокруг районов с известной минерализацией. В таком случае следует ожидать, что известные месторождения обычно будут демонстрировать более высокий уровень пространственной ассоциации с объектами, которые были преимущественно нанесены на карту в тех же районах.

В то же время, преимущество геофизических элементов заключается в том, что они представляют собой совершенно непредвзятый подход к определению структуры. Они одинаково хорошо работают в трудно исследованных районах и зонах под покровом, как и в зонах обнаженного фундамента. Из этого следует что, если количество неоткрытых месторождений, связанных со скрытыми структурами, представленными геофизическими границами, велико по сравнению с количеством известных месторождений, статистическая значимость этих немногих известных месторождений очень сильно снижается. Если это так, то чисто статистический анализ WofE рассказывает только часть истории. Это особенно вероятно в СЗ бассейне Макарура, где во многих перспективных районах проводилась лишь поверхностные поиски урана до того, как доступ был серьезно ограничен с созданием Национального парка Какаду в конце 1970-х годов. Способность процедур обнаружения перспективных объектов традиционно была очень сложной, неизбежно означает, что они демонстрируют статистически более слабую пространственную связь с минерализацией, особенно там, где большая часть исследуемой территории находится под покровом. Однако за пределами Национального парка эти ранее непризнанные особенности могут представлять важные и в значительной степени нетронутые объекты поисков.

5.6. Интерпретация результатов МРМ с нечеткой логикой.

Геологическая обоснованность моделей минерального потенциала нечеткой логики для месторождений урана «типа несогласия» в СЗ бассейне Макарура и бассейне Атабаска подтверждается тем фактом, что большинство известных урановородных месторождений, узлов и районов находятся в пределах повышенной или очень высокой перспективности на результирующих прогнозных картах (СЗ бассейн Макарура - 80%, бассейн Атабаска - 85,2%). Кроме того, модели выявили несколько новых областей, содержащих все ингредиенты для урановой минерализации «типа несогласия», которые, возможно, были упущены предыдущими поисками.

Представленные модели следуют консервативному подходу и были построены таким образом, что они учитывают известное распределение минерализации урана без попыток использовать новые методологии, выходящие за рамки того, что подтверждается статистическим анализом. Значительным преимуществом этого типа моделирования является то, что по мере появления новых знаний данные могут быть соответствующим образом изменены с учетом инновационных концепций и новых результатов. В модель также могут быть легко включены недавно полученные или улучшенные версии пространственных данных, особенно те, которые обеспечивают равномерный охват всей интересующей области.

Ограничения того, что может быть достигнуто с помощью МРМ, могут возникнуть из-за неспособности имеющихся в настоящее время данных адекватно описать ключевые

компоненты системы рудообразования. Геологические объекты, представленные в пространственных данных, также могут характеризоваться непоследовательно или даже давать неверную картину их связи с минерализацией по широкому спектру причин, включая, но не ограничиваясь этим, неполное картографирование, частичную эрозию или частичное покрытие критических объектов более молодыми осадочными образованиями (т.е. важные объекты, которые присутствуют в третьем измерении, могут не быть представлены в 2D пространственных данных).

Минерализация урана в бассейнах СЗ Макартур и Атабаска тесно связана со структурой, и это использовалось в качестве ключевого элемента в обеих моделях.

Структуры, подвергающиеся реактивации во время более поздних тектонических событий, создают «ослабленные» зоны брекчии. Эти «структурно подготовленные зоны-хозяева» были признаны критическими элементами контроля минерализации урана на месторождении Аллигатор-Риверс в СЗ бассейне Макартур, где с 1970-х годов большие площади покрыты национальными парками, доступ к которым ограничен, что приводит к неполному пониманию архитектуры разломов фундамента. Кроме того, среднепротерозойские и более молодые породы, заполняющие бассейн, относительно недеформированы по сравнению с нижележащими палеопротерозойскими отложениями, которые пережили несколько фаз интенсивной деформации. Хотя несколько крупных структур заметно простираются от областей обнаженного палеопротерозойского фундамента в покровные толщи (например, разлом Рейнджер и зона разлома Булман), существуют некоторые сомнения относительно того, адекватно ли структура глубоко эродированных каньонов, пересекающих песчаник Комболджи, отражает структурную геометрию нижележащего фундамента. Характер сочленения может быть более тесно связан с поздней фазой регионального изгиба и, следовательно, в значительной степени не связан с крупномасштабными структурами фундамента, которые потенциально могут содержать урановую минерализацию. Крупнейшие известные месторождения урана тесно связаны с листрическими разломами в фундаменте. Подобные структуры необязательно могут иметь какое-либо выражение в вышележащих верхнепротерозойских осадочных толщах подгруппы Комболджи, как показано на примере месторождения мирового класса Джабилука - под тонким слоем транспортируемого песка, который маскировал их радиометрический отклик.

Из-за высокого уровня важности, приписываемого близости к архейским комплексам и наличию благоприятных вмещающих литологий, урановые месторождения Рамджангл и Аллигатор Риверс являются наиболее благоприятными зонами в МРМ. На этих месторождениях находятся крупнейшие залежи урана в этом районе. В отличие от этого, урановое месторождение долины Южного Аллигатора демонстрирует лишь умеренно

повышенную перспективность (рис. 20) и содержит несколько небольших залежей и только два незначительных месторождения, которые являются полиметаллическими по своей природе (U, Au ± PGE, Ni, Co). В районе не обнаружено пород архейского возраста и, как правило, менее благоприятной литологии, за исключением небольшого участка гематитовой брекчии вокруг месторождения Эль-Шерана. В отличие от крупных месторождений урана, эти месторождения контролируются субвертикальными структурами. Региональная модель эффективно выделяет как месторождения Эль-Шерана, так и Коронашн-Хилл, но может быть построена более подробная МРМ, специально разработанная для отражения генетической модели минерализации уранового месторождения реки Южный Аллигатор (рис. 10), чтобы эффективно ориентироваться на аналоги основных минерализованных зон.

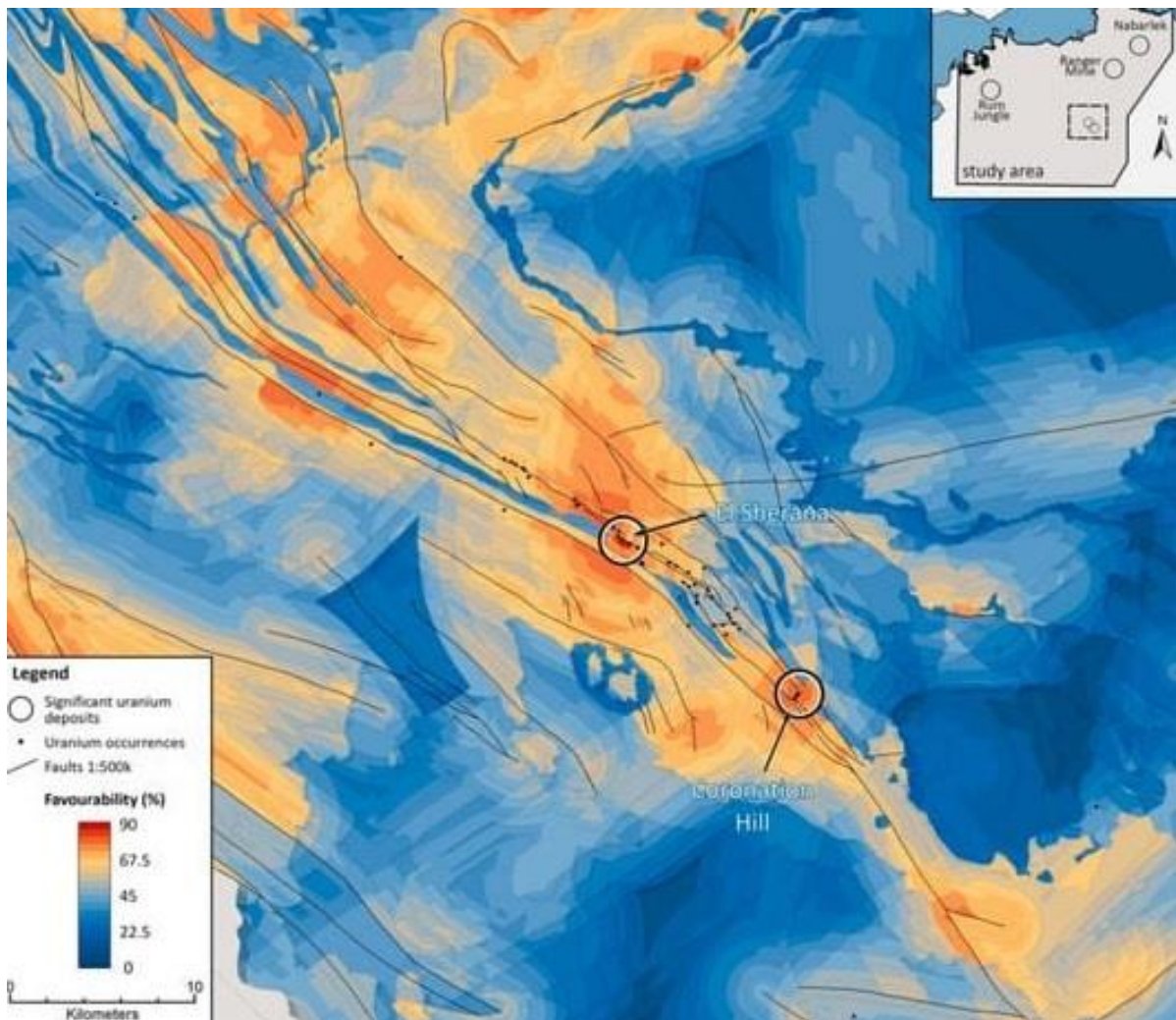


Рис. 10. Результат МРМ на урановом месторождении реки Южный Аллигатор

МРМ бассейна Атабаска эффективно «заново открывает» основные урановые объекты. Зоны графитовых проводников являются поисковыми признаками уранового оруденения «типа несогласия» в бассейне Атабаски, где они проявляются при ЭМ-съемках. Они соответствующим образом взвешены в МРМ. Успех поисковых программ, нацеленных на электромагнитные проводники, подтверждает идею генетической связи между

восстановителями углеродных частиц и минерализацией урана. Однако этот успех также может привести к некоторой степени "предвзятости при поисках", когда генетическая важность проводников переоценивается из-за отсутствия альтернативных методик определения целей. Богатые железом силикаты и сульфиды были предложены в качестве эффективных восстановителей, с присутствием углеродных частиц (т.е. проводников) или без них. Однако такие месторождения, которые не имеют пространственной привязки к электромагнитным проводникам и не имеют других характерных геофизических признаков, было бы значительно труднее обнаружить под покровом и, следовательно, включить в альтернативные модели.

Недавние открытия за пределами бассейна Атабаска (Arrow, Triple R—Patterson Lake South), а также историческое оруденение озера Клафф демонстрируют существование «нетрадиционных» залежей урана, расположенных в фундаменте, ниже несогласия. Концептуальное нацеливание на такие системы и разработка соответствующих моделей минерального потенциала легко адаптируются путем внесения изменений в модель, если для критических компонентов системы минерализации можно найти соответствующие характеристики. Альтернативные модели, в которых больший акцент делается на геофизических линейных (например) зонах или которые учитывают менее традиционные представления о генезисе урановых месторождений, могут быть быстро протестированы с помощью этой методологии и использованы для достижения новых и эффективных поисковых целей.

Модели регионального масштаба для этих двух протерозойских бассейнов, неизбежно должны быть обобщены из-за необходимости учитывать широкий спектр геологических условий и местный контроль оруденения. Представленные модели построены таким образом, что они уравнивают необходимость быть как можно более разборчивыми, не игнорируя большие площади опосредования. На методологию любого поискового метода, который опирается на пространственные данные в качестве исходных, накладываются значительные ограничения из-за доступности и качества этих наборов данных. Ошибки, пропуски или неточности во входных данных неизбежно распространяются на результаты (т. е. концепция «поступление мусора = выбытие мусора»). По этой причине данные должны быть строго проверены перед включением в модель, чтобы избежать "загрязнения" анализа некачественными или неполными данными.

Модели дополнительно ограничены их неспособностью включить критерии и признаки, которые не имеют географически согласованного представления в доступных пространственных данных в масштабе исследования (например, присутствие восстановителей, которые не связаны с электромагнитными проводниками и других геофизически различимых

свойств). Критерии, представляющие отличительные особенности изменения вмещающих пород, которые обычно окружают месторождения урана «типа несогласия», не включены в МРМ из-за их относительно небольшого размера по сравнению с масштабом поисков в пределах всего бассейна. Эффекты гидротермальных изменений приводят к возникновению большинства геофизических, геохимических и минералогических признаков оруденения, поэтому последующие поиски должны быть спланированы таким образом, чтобы они были сосредоточены в высокоперспективных районах, определенных в региональном МРМ, но с акцентом на местные средства контроля минерализации, такие как эффекты гидротермальных изменений.

Модели, представленные для каждого бассейна, представляют собой лишь одно из большого числа возможных решений. Каждый шаг от построения карты критериев, присвоения весов и проектирования сети вывода завершается данными «экспертов». Хотя модели являются подходящим представлением текущего состояния знаний о минерализации урана в двух протерозойских бассейнах, мнения экспертов могут отличаться от тех, которые составляют их основу. Важной особенностью этого типа анализа является то, что он допускает быструю итеративную модификацию. Новые или перекомпилированные устаревшие данные, пересмотренные веса или модифицированные схемы логических сетей, нацеленные на конкретные типы месторождений или учитывающие альтернативные генетические модели, могут быть легко адаптированы и протестированы.

Несмотря на описанные выше ограничения, методология МРМ представляет собой эффективный инструмент для сокращения пространства поиска и может применяться в широком диапазоне масштабов при условии наличия подходящих пространственных данных. В региональном масштабе сила методологии заключается в ее способности выделять широкие зоны с повышенным минеральным потенциалом, а не отдельные поисковые цели. Поисковые объекты, выделенные с помощью МРМ, должны быть ранжированы и расставлены по приоритетам с использованием данных более высокого разрешения и включением местного контроля минерализации.

Считается, что такой гибридный подход, ориентированный на усиление интеллекта (IA), а не на искусственный интеллект (AI), является наиболее эффективным способом использования МРМ, поскольку системы, усиливающие интеллект, могут при любом заданном уровне доступных системных технологий превзойти системы искусственного интеллекта. То есть машина и разум могут победить машину, имитирующую разум, работающую самостоятельно.

6. Выводы.

Таким образом, основные выводы по прогнозному нечетко-логическому моделированию минерального потенциала (МРМ) для наиболее перспективных бассейнов Атабаска и СЗ Макартура сводятся к следующему:

1. В результате прогноза в каждой из областей исследования было выделено несколько еще не опоскованных концептуальных целевых зон. Важно отметить, что подавляющее большинство известных м-ний урана были правильно «переоткрыты», что демонстрирует эффективность и применимость прогноза для целенаправленных поисков. Последующие ГРР должны быть сосредоточены на площадях, определенных как весьма благоприятные. Они должны быть спроектированы таким образом, чтобы учитывать специфические локальные механизмы контроля минерализации и включать геохимические и геофизические характеристики о комплексах гидротермальных изменений.

2. Характер ГРР на уран «типа несогласия» регионального масштаба в протерозойских бассейнах (т.е. обнаружение скрытых месторождений под значительным покровом на основе геофизических методов) в сочетании с обычно низкой плотностью данных накладывает некоторые ограничения на использование методологий МРМ. Как и при любом подходе к поисковым целям, несоответствия в качестве данных и плотности сбора в региональном масштабе неизменно приводят к некоторой степени смещения в сторону более богатых данными районов с месторождениями и повышению уровня неопределенности в недостаточно изученных областях. Следует отметить, что для некоторых частей бассейна Атабаска существуют обширные наборы геохимических данных и данных сейсморазведки. И хотя они могли бы предоставить полезный исходный материал для более крупномасштабного МРМ, их использование в масштабах всего бассейна было сочтено нецелесообразным, учитывая, что эти данные охватывают только часть бассейна.

3. Многие исходные данные представляют собой интерпретации наборов геофизических материалов 1-го и 2-го порядков, которые сами по себе являются компиляциями отдельных съемок, которые сильно различаются по разрешению и качеству. Однако геофизические данные охватывают всю площадь относительно равномерно, а процедуры обнаружения геофизических структур представляют полностью непредвзятую интерпретацию и, как таковые, предлагают действенный инструмент для определения поисковых целей под чехлом.

4. Альтернативные прогнозные концепции и данные могут быть быстро включены и оценены в нечеткой логике моделирования минерального потенциала. При надлежащем использовании и в сочетании с другими методами определения целей МРМ является мощным инструментом в процессе принятия решений для эффективного сокращения пространства

поисков при одновременном повышении вероятности обнаружения и снижении риска и затрат.

2. РЕГИОНАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ W, Sn и Nb-Ta нечетко-логическое моделирование минерального потенциала «МРМ» на основе интегрированной информации по Руанде (Центральная Африка)

Введение

Потребность в открытии новых месторождений и составлении карт потенциальных возможностей значительно возросла в последние годы. МРМ был впервые предложен Cargill, и методы МРМ могут быть классифицированы на типы, основанные на данных, знаниях или гибридных системах, в зависимости от того, оцениваются ли параметры функции на основе пространственного статистического анализа или на основе экспертных знаний. На анализ данных, основанный на знаниях, влияет ограниченная способность человеческого мозга обрабатывать множество переменных одновременно, что приводит к недостаточной воспроизводимости. Это ограничение может быть преодолено алгоритмами в quantitative МРМ, среди которых контролируемые алгоритмы могут выполнять более точные оценки перспективности, чем неконтролируемые. Распространенные контролируемые алгоритмы включают вес доказательств, логистическую регрессию, искусственную нейронную сеть обратного распространения (BP-ANN), машину опорных векторов (SVM), случайный лес (RF) и глубокие методы обучения. Основными задачами количественного МРМ являются комплексный анализ геологических, геофизических, геохимических данных, данных дистанционного зондирования и бурения, и, наконец, выделение перспективных площадей. Это включает в себя сбор данных, построение концептуальной модели минерализации, преобразование данных в отображаемые слои, идентификацию слоев-критериев, комплексные вычисления и обучение, а также картирование и тестирование результатов поисков. Как положительные, так и отрицательные образцы, а также моделирование взаимосвязей между образцами и слоями-критериями являются основой для количественной оценки потенциала минерализации.

Геологические, геофизические данные и данные бурения обычно необходимы в 3D МРМ, в то время как во время 2D МРМ обычно необходимы геологические, геофизические, геохимические данные и данные дистанционного зондирования. В некоторых случаях доступ к достаточным и подробным данным, связанным с минерализацией, недоступен, что ограничивает возможность быстрого просмотра регионального потенциала минерализации с помощью МРМ. К счастью, имеются некоторые данные из открытых источников, и обширная геологическая литература существует онлайн, включая геологические, геофизические данные и данные дистанционного зондирования. Они оказывают большую помощь в МРМ. Что касается дистанционного зондирования, то оно используется для регионального прогнозирования с 1970-х годов и может предоставить беспрецедентные возможности на

начальных этапах поисков. Будучи легкодоступным, пространственно непрерывным и спектрально широким, достаточная интерпретация и извлечение геологической информации с использованием данных дистанционного зондирования могли бы оказать большую помощь. Визуальная или автоматизированная интерпретация, соотношение полос, анализ главных компонентов (РСА), отображение спектральных углов (SAM) и другие методы подгонки обычно применяются к мультиспектральным и гиперспектральным изображениям для идентификации геологических элементов и изменений минералов. Чтобы справиться с извлечением изменений в зоне растительности, внедрили анализ направленного главного компонента (DPCA) для улучшения целевых изменений. Было проведено пилотное исследование для изучения возможной взаимосвязи между содержанием элементов в почве и горных породах, коре и спектральными характеристиками. Результат показал, что лабораторное гиперспектральное сканирование может спектрально различать образцы из минерализованной зоны, в то время как воздушное гиперспектральное сканирование не было идеальным. Из-за механизма оптического дистанционного зондирования пиксели в зоне густой растительности необходимо маскировать во время извлечения минеральных изменений. Маскировка может привести к тому, что остаточные допустимые пиксели и изменения минералов будут рассеяны на изображениях, что затруднит идентификацию зоны изменений.

Руанда расположена в центре Африки. Характеристики минерализации W, Sn и Nb-Ta в Руанде были тщательно изучены, включая материалы по: региональным тектоническим событиям, минералогии и минерализации, рудолокализирующим факторам, фракционированию и зонированию пегматитов, источникам металлов, геохимии, металлогеническим флюидам, датированию и потенциальным целям поисков на основе интерпретации аэромагнитных данных. Однако количественное региональное картирование перспективности W, Sn и Nb-Ta с использованием интегрированной информации, что имеет первостепенное значение для MPM, в Руанде не проводилось.

Для того, чтобы получить предварительное распределение перспективных участков W, Sn и Nb-Ta в Руанде были проведены: (1) обобщение металлогении с помощью материалов по геологии, геофизики и дистанционному зондированию из открытых источников; (2) дополнительный процесс интерполяции–определения плотности (IDD) на извлеченной карте изменений после метода направленного анализа главных компонентов (DPCA); (3) интеграция геологических, геофизических данных и данных дистанционного зондирования, алгоритмом случайного леса для картирования потенциала минерализации, и (4) применен k^2 -кратный метод перекрестной проверки, чтобы уменьшить дисбаланс между положительными и

отрицательными данными. В результате была построена прогнозная карта с выделением поисковых площадей на W, Sn, Nb-Ta.

1. Область исследования.

1.1. Геологические условия.

Руанда - страна, не имеющая выхода к морю, расположенная в Центральной Африке (рис. 1а). На севере граничит с Угандой, на востоке с Танзанией, на юге с Бурунди и на западе с Демократической Республикой Конго. Страна расположена в 120 км к югу от экватора, занимая площадь суши примерно в 26 000 км², и, как правило, холмистая, известная как “Земля тысячи холмов”, хотя здесь также есть болота и обширные горные районы.

ЮВ и СВ части пояса Кибара (КИБ) Центральной Африки подразделены на пояс Карагве-Анколе (КАБ) и на западную и восточную части базит-ультрабазитового пояса Мусонгати-кабанга. Западная часть территории характеризуется массивными средними и кислыми интрузиями, восточная часть - интрузий не имеет. Руанда расположена в западной части КАБ (рис. 1б), которая в основном включает мезопротерозойские метаосадки, мезо-неопротерозойскими граниты и кайнозойские вулканические породы. Наличие метаморфических комплексов предполагает интенсивные тектонические события в геологической истории.

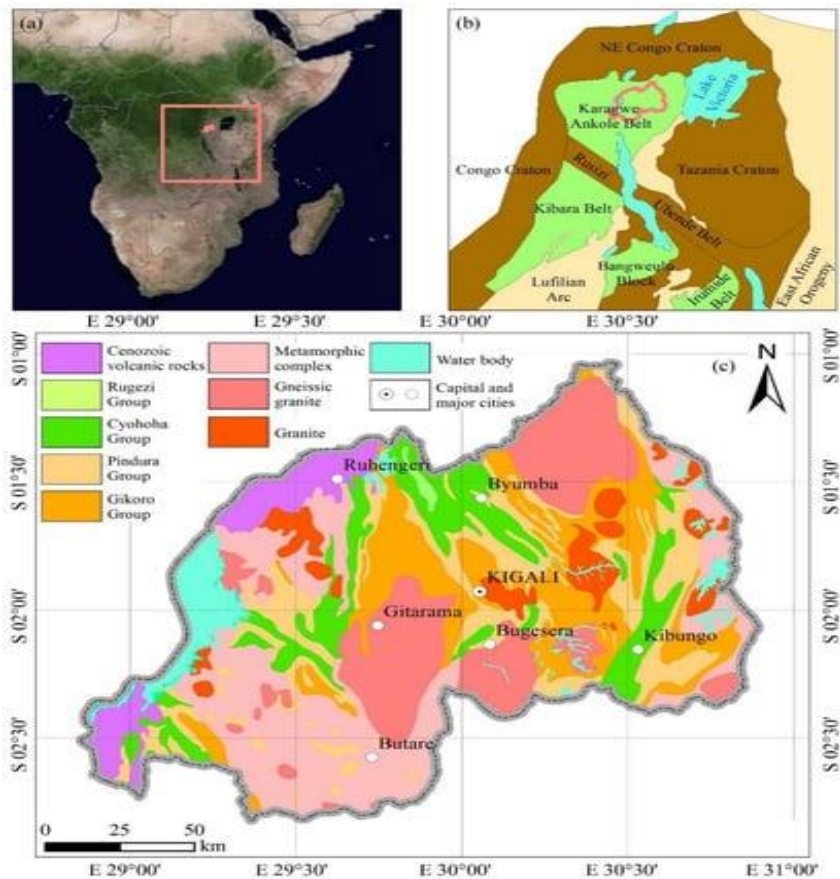


Рис. 1. (а) местоположение в Центральной Африке; (б) геологические условия; (с) региональная геологическая карта Руанды.

Осадочные породы в КАБ в основном состоят из метаосадков и редких карбонатных пород. Мезопротерозойские комплексы в Руанде определяются как супергруппа Аканьяру, которая состоит из четырех групп (рис. 1с).

Основными магматическими событиями были гранитные интрузии S-типа, которые в основном были вызваны вероятным расслоением литосферы и астеносферным апвеллингом 2 млрд. лет назад во время субдукции между кратонами Конго и Танзании. Гранитные интрузии сформировали четыре поколения, включая G1, G2, G3 (гнейсовидные) и G4 (оловоносные). Граниты G1–G3 внедрились в 1380 ± 10 млн лет (U-Pb), а граниты G4 появились около 986 ± 10 млн лет (U-Pb). Граниты G4 - это лейкограниты, характеризующиеся равнозернистыми, нерасслоившимися щелочными полевыми шпатами, мусковитами, пятнами биотитов и вторичными минералами, включая апатит, турмалин, ильменит, монацит, ксенотим и циркон. Кроме того, они обогащены Li, Rb, Cs, U и Sn.

Пегматиты и кварцевые жилы являются важными рудоносными геологическими телами. Пегматиты обычно рассматриваются как продукты дифференциации эволюционировавших лейкогранитов и пространственно-временные ассоциации с пералюминиевыми гранитами G4. Региональная пегматитовая зона в 30 км к западу-юго-западу от месторождения Някабинго имеет возраст в 975 ± 8 млн лет (U-Pb), а Ar-Ar возраст образцов мусковита варьируется от 940 млн до 560 млн лет, что предполагает позднепротерозойские тектонические термальные события. Кроме того, имеется тесная пространственно-временная взаимосвязь между Sn-кварцевыми жилами и раннепротерозойскими интрузиями лейкогранитов.

Структурные деформации представлены региональными антиклиналями и синклиналями, которые могут быть идентифицированы на материалах дистанционного зондирования. Их оси в основном ориентированы на северо-запад и северо-восток. В целом, максимальное напряжение, по-видимому, было регионально ориентировано на EW во время событий сжатия, а минимальное напряжение, как ожидалось, было ориентировано на EW во время релаксации при растяжении.

1.2. Металлогенические характеристики.

Фактором, определяющим W, Sn и Nb-Ta минерализацию пегматитов и кварцевых жил является пространственно-временная связь с гранитами G4.

Месторождения W в центральной Руанде связаны с углеродистыми сланцами, которые служат реактивными горизонтами. W-несущие кварцевые жилы на месторождении Nyakabingo расположены на восточном склоне антиклинали и залегают в песчаниках и в черных, богатых органикой метапелитовых породах. Содержащие Sn кварцевые жилы на месторождении Musha и Sn-Ta пегматиты на месторождении Ntunga залегают в метаморфических пелитах и

метапесчаниках. Иногда кварцевые жилы, содержащие Sn, залегают в песчанике и кварците, богатых мусковитом и полевым шпатом, а кварцевые жилы, содержащие W, залегают в богатых органикой метапелитах. Анализ рудных кварцевых жил показал, что гидротермальных флюиды состояли из 20-95% магматических флюидов и 5-80% метаморфических флюидов [53]. Из-за параллельных залеганию швов, взаимодействий между флюидами и пластами и участия метаморфических флюидов минерализация может иметь тенденцию быть селективной по пластам.

Судя по аэрофотоснимкам, рудные залежи тесно связаны с различными реактивированными системами разрывных нарушений, в том числе: в ядрах и по флангам вторичных антиклиналей, трещинными пегматитовыми зонами вдоль плоскостей расщепления в региональных сдвиговых зонах и др.

Рудосопровождающие гидротермально-метасоматические изменения, содержащие W, представлены ассоциациями кварца и эугедрального арсенопирита, пирита, шеелита, массивного ферберита и молибденита. Касситеритовая минерализация тесно связана с интенсивными филлическими изменениями, в то время как колумбит-танталитовая минерализация сопровождается интенсивным щелочным метасоматозом (широкое распространение альбита и белой слюды). Арсенопирит, пирит и пирротин из жильных месторождений, содержащих W и Sn, предполагают, что по крайней мере одна сульфидная фаза существовала на более поздних стадиях минерализации W и Sn. Иллит является распространенным продуктом изменения полевых шпатов, встречающихся в минерализованных зонах, а гетит является типичным продуктом выветривания пирита. В целом, минерализация W, Sn и Nb-Ta сопровождается поверхностными концентрациями гетит-кварца, кварца и иллита.

2. Методы исследований.

2.1. Обработка данных.

На рисунке 2 показана структура регионального количественного МРМ, состоящая из трех основных частей: обработка данных, моделирование и прогнозирование. Были собраны геологические, геофизические данные, данные дистанционного зондирования, почвенный покров, география и минерализация (табл. 1).

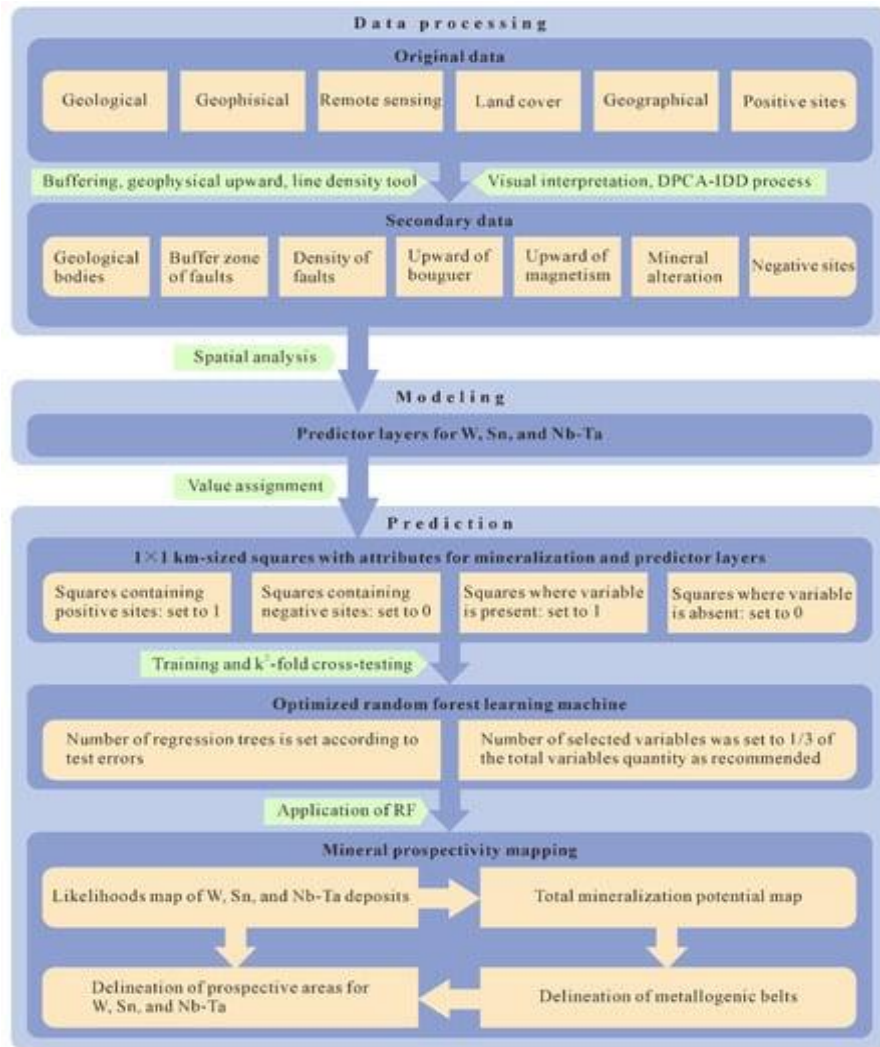


Рис. 2. Блок-схема регионального количественного МРМ.

Табл. 1.

Исходные и преобразованные данные.

Data Type (Resolution)	Original Data (Format)	Secondary Data	Original Source
Geology (-)	Regional geological map (jpg) Faults in western Rwanda (jpg)	Buffer zones of granites boundaries	[25,53]
Gravity (2')	Bouguer anomaly (xlsx)	Bouguer 1000 m-upward map Faults derived from Bouguer 1000 m-upward map Buffer zones of Bouguer faults Linear density map of Bouguer faults	Complete spherical Bouguer gravity anomaly from Bureau Gravimetrique International (BGI)
Magnetism (2')	Magnetic anomaly (xlsx)	Magnetic anomaly 1000 m-upward map	Earth magnetic anomaly grid from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
Multispectral imageries (30 m)	Landsat 8 OLI path/row: 172061, 172062 173061, 173062 (.tiff)	Faults interpreted in eastern Rwanda from remote sensing Buffer zones of geological remote sensing faults Linear density map of geological remote sensing faults Goethite, illite, and quartz alterations extracted from remote sensing	United States Geological Survey (USGS)
DEM (30 m)	ASTER GDEM path/row: S02E029, S02E030 S03E028, S03E029 S03E030 (.img)	Faults interpreted in eastern Rwanda from remote sensing	Geospatial Data Cloud (in Chinese)
Landcover (30 m)	Globeland30 path/row: S36_00_2020LC030 S36_00_2020LC030 (.tiff)		Globeland30 (in Chinese)
Roads and rivers (-)	Roads and rivers (.shp)	50 m buffer zones of roads and rivers	OpenStreetMap
Mineralization (-)	Known positive sites (deposits or occurrences) of W, Sn, Nb, and Ta (jpg, .shp)	Negative sites of W, Sn, Nb, and Ta	Private collections

На основе исходных и вторичных данных были сформированы соответствующие слои (табл. 2, рис. 3).

Табл. 2.

Соответствующие слои минерализации W, Sn и Nb-Ta в Руанде.

Original and Secondary Data	Relevant Layers (Sequential Number)
Geological map	Cyohoha group (#1), Pindura group (#2), Gikoro group (#3), metamorphic complex (#4), granites (#5)
Buffer zones of granites boundaries	1 km (#6), 2 km (#7), 3 km (#8), 4 km (#9), 5 km (#10), 6 km (#11)
Buffer zones of Bouguer faults	1 km (#12), 2 km (#13), 3 km (#14), 4 km (#15)
Linear density map of Bouguer faults	0 (#16), 0–0.04 (#17), 0.04–0.07 (#18), 0.07–0.11 (#19), 0.11–0.30 (#20)
Buffer zones of geological remote sensing faults	1 km (#21), 2 km (#22), 3 km (#23), 4 km (#24)
Linear density map of geological remote sensing faults	0–0.04 (#25), 0.04–0.09 (#26), 0.09–0.16 (#27), 0.16–0.26 (#28), 0.26–0.60 (#29)
Bouguer 1000 m-upward map	–55.18––46.01 (#30), –46.01––33.00 (#31), –33.00––27.68 (#32), –27.68––18.51 (#33), –18.51––9.34 mGal (#34)
Magnetic anomaly 1000 m-upward map	–39.69––0.35 (#35), –0.35–10.50 (#36), 10.50–17.25 (#37), 17.25–22.87 (#38), 22.87–55.83 nT (#39)
Mineral alteration	Goethite (#40), illite (#41), and quartz (#42)

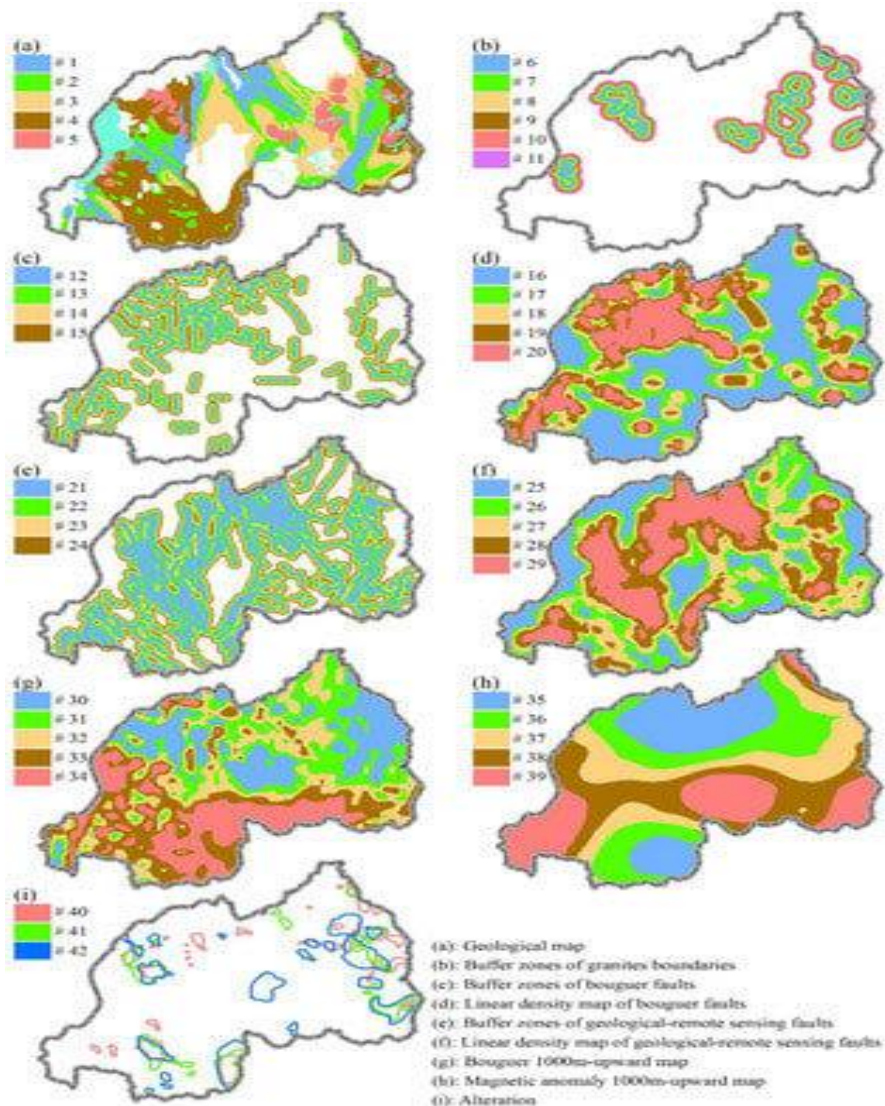


Рис. 3. Соответствующие слои, задействованные в этом исследовании.

В частности, буферные зоны были сгенерированы с помощью инструмента “буфер” в ArcGIS, карты аномалий и были классифицированы на 5 равных по площади диапазонов, разломы были интерпретированы на гравикарте Буге в соответствии с распределением зоны линейного градиента, карты линейной плотности были сгенерированы с помощью инструмента “линейная плотность” в ArcGIS и также были классифицированы на 5 равных по площади диапазонов. Для выявления геологических разломов были использованы снимки Landsat 8 OLI и ASTER GDEM. Были созданы 13-км, 10-км и 17-км буферные зоны для W, Sn и Nb-Ta.

Руанда в основном покрыта лесами и сельскохозяйственными угодьями, что затрудняет проведение ГПП. Чтобы уменьшить влияние «шума», был использован метод направленного анализа основных компонентов (DPCA) для выявления необходимой геологической информации между двумя изображениями с соотношением полос, а также дополнительный процесс интерполяции плотности разграничения (IDD) после метода DPCA. В процесс IDD были включены семь основных этапов: (1) все пиксели на исходной карте изменений (рис. 4a) были преобразованы в точки (рис. 4b) в ArcGIS; (2) карта изменений № 2 (рис. 4d) была сгенерирована с помощью инструмента “интерполяция” по точкам; (3) соответствующая карта плотности точек № 1 (рис. 4c) была сгенерирована с помощью инструмента “плотность точек”; (4) диапазон карты плотности #1 (рис. 4c) был расширен до 0,5 ~ 1,0, а именно карта плотности точек #2 (рис. 4f); (5) карта изменений #3 (рис. 4e) был создан на основе произведения карты изменений № 2 (рис. 4d) и карты плотности точек № 2 (рис. 4f); (6) были проанализированы статистические данные карты изменений № 3 (рис. 4e), и нижний предел аномалии был определен путем добавления среднего значения к 2,5-кратному стандартному отклонению (рис. 4h), и (7) карта изменений № 4 (рис. 4g) был нанесен вдоль карты аномалий среднего значения $+2,5 \text{ Stdev}$ (рис. 4h), чтобы представить распределение конкретного минерального изменения. Изменения гетита, иллита и кварца в Руанде были получены с помощью процесса DPCA-IDD (рис. 3i).

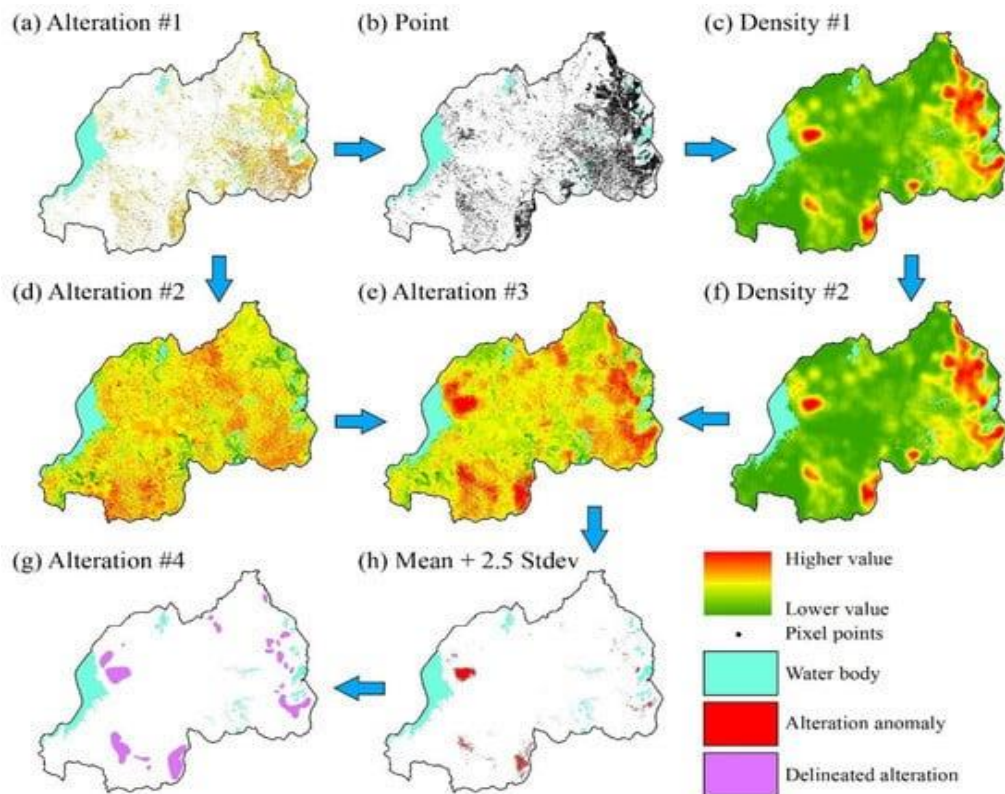


Рис. 4. Схема процесса интерполяции–плотности–разграничения (IDD). (а) Карта изменений № 1, полученная в процессе DPCA; (б) Карта точек, полученная на 1-м этапе; (с) Карта плотности № 1, полученная на 3-м этапе; (д) Карта изменений № 2, полученная на 2-м этапе; (е) Карта изменений № 3, полученная на 5-м этапе; (ф) Карта плотности № 2, полученная на 4-й карте; (г) Окончательное изменение карта №4, полученная на 7-м шаге; (h) Изменение карты аномалий №3 на 5-м шаге.

2.2. Моделирование.

Были разработаны специальные модели для идентификации слоев-критериев и обеспечения точности МРМ. Процессы минерализации в Руанде включают: (1) отложение метаосадочных пород; (2) внедрение гранитов G1-G3 в зонах растяжения; (3) период деформаций 1000 млн лет; (4) внедрение гранита G4 после складчатости; и (5) внедрение минерализованных пегматитов и жил. Рудообразующий гранит G4 был заложен около 986 млн лет назад, что указывает на то, что пегматитовая, жильная минерализация W, Sn и Nb-Ta могла быть возможна только в геологических телах, более ранних, чем неопротерозой, и была селективной по пластам и контролировалась структурами; кроме того, поверхностные концентрации гетит-кварца, кварца и иллита могли частично быть индикаторами для минерализации W, Sn и Nb-Ta соответственно. Кроме того, геофизические поля также могут отражать наличие факторов, контролирующих руду.

Было использовано программное обеспечение способное выполнять статистический анализ пространственных соотношений между соответствующими слоями и перспективными участками. Соответствующие слои, содержащие достаточное количество положительных участков, были определены в качестве слоев-критериев для каждого металла, находки которых были обобщены в прогностической модели (табл. 3, 4 и 5).

Прогнозная модель минерализации W.

Ore Genesis	Type of Layers	Original and Secondary Data	Predictor Layers
Sn, Nb, Ta in pegmatites, W, Sn in quartz veins	Ore-controlling factors	Geological map	#2, #3, #4
		Buffer zones of granites boundaries	#11
		Buffer zones of Bouguer faults	#14
		Linear density map of Bouguer faults	#19, #20
		Buffer zones of geological remote sensing faults	#22
	Mineralization indicators	Linear density map of geological remote sensing faults	#28, #29
		Bouguer 1000 m-upward map	#30, #31
		Magnetic anomaly 1000 m-upward map	#36, #37
		Alteration	#40, #42

Табл. 4.

Прогнозная модель минерализации Sn.

Ore Genesis	Type of Layers	Original and Secondary Data	Predictor Layers
Sn, Nb, Ta in pegmatites, W, Sn in quartz veins	Ore-controlling factors	Geological map	#1, #2, #3, #4
		Buffer zones of granites boundaries	#11
		Buffer zones of Bouguer faults	#14
		Linear density map of Bouguer faults	#19, #20
		Buffer zones of geological remote sensing faults	#22
	Mineralization indicators	Linear density map of geological remote sensing faults	#28, #29
		Bouguer 1000 m-upward map	#30, #31, #32
		Magnetic anomaly 1000 m-upward map	#36, #37
		Alteration	#42

Табл. 5.

Прогнозная модель минерализации Nb-Ta.

Ore Genesis	Type of Layers	Original and Secondary Data	Predictor Layers
Sn, Nb, Ta in pegmatites, W, Sn in quartz veins	Ore-controlling factors	Geological map	#1, #3, #4, #5
		Buffer zones of granites boundaries	#11
		Buffer zones of Bouguer faults	#14
		Linear density map of Bouguer faults	#19, #20
		Buffer zones of geological remote sensing faults	#22
	Mineralization indicators	Linear density map of geological remote sensing faults	#28, #29
		Bouguer 1000 m-upward map	#30
		Magnetic anomaly 1000 m-upward map	#36, #37
		Alteration	#41

Веса различных слоев-предикторов могут быть рассчитаны в соответствии с пространственными распределениями между месторождениями и слоями-предикторами, алгоритм проиллюстрирован уравнением:

$$W_I^+ = \ln \frac{P(B_A/D_A)}{P(B_A/D_B)}, W_I^- = \ln \frac{P(B_B/D_A)}{P(B_B/D_B)}, C_I = W_I^+ - W_I^- \quad (1)$$

где D_A и D_B - количества единиц с месторождениями и без них соответственно, B_A и B_B - количества единиц с определенным предикторным слоем I и без него соответственно. $P(B_A/D_A)$ - вероятность B_A при наличии D_A в единице, W_I^+ и W_I^- - веса I при наличии и отсутствии I в единице соответственно. C_I означает контраст, является показателем того, насколько хорошо слой-предиктор связан с месторождениями, и обозначается как положительный (I благоприятен для минерализации) или отрицательный (невыгодный).

В этом исследовании был использован метод весомости доказательств для предварительной проверки пространственных контрастов слоев-предикторов (табл. 6).

Веса и контрасты слоев-предикторов для минерализации W, Sn и Nb-Ta.

Predictor	W			Predictor	Sn			Predictor	Nb-Ta		
	W+	W-	Contrast		W+	W-	Contrast		W+	W-	Contrast
#19, #20	0.68	-0.81	1.49	#36, #37	0.50	-0.63	1.14	#14	0.65	-1.08	1.74
#28, #29	0.56	-0.85	1.41	#28, #29	0.45	-0.58	1.03	#5	1.29	-0.23	1.53
#36, #37	0.48	-0.59	1.08	#11	0.68	-0.35	1.02	#19, #20	0.62	-0.69	1.31
#11	0.68	-0.35	1.03	#30, #31, #32	0.26	-0.74	1.00	#30	0.81	-0.46	1.27
#22	0.29	-0.69	0.99	#22	0.27	-0.62	0.89	#36, #37	0.49	-0.60	1.09
#14	0.42	-0.47	0.90	#3	0.52	-0.19	0.71	#28, #29	0.45	-0.57	1.02
#30, #31	0.38	-0.45	0.83	#19, #20	0.31	-0.24	0.55	#11	0.58	-0.27	0.84
#2	0.43	-0.16	0.60	#1	0.44	-0.10	0.53	#41	0.57	-0.06	0.62
#42	0.46	-0.09	0.55	#14	0.27	-0.25	0.53	#22	0.20	-0.40	0.60
#4	0.34	-0.15	0.49	#2	0.19	-0.06	0.25	#4	0.29	-0.12	0.41
#40	0.34	-0.03	0.37	#4	0.16	-0.06	0.22	#1	0.30	-0.06	0.35
#3	0.16	-0.04	0.21	#42	0.05	-0.01	0.06	#3	0.08	-0.02	0.09

Линейная плотность, которая описывает энергоёмкость тектонической активности, в основном имела высокий пространственный контраст (1,49, 1,41 для W, 1,03, 0,55 для Sn, 1,31, 1,02 для Nb-Ta); буферные зоны разломов, в основном обладали средним пространственным контрастом (0,99, 0,90 для W, 0,89, 0,53 для Sn, 1,74, 0,60 для Nb-Ta). В качестве широко применяемых индикаторов минерализации использовалось распределение аномалий Буге и магнитных аномалий, характеризующих различные глубинные геологические объекты. В этом исследовании пространственные контрасты высокого и среднего уровня (1,08, 0,83 для W, 1,14, 1,00 для Sn, 1,27, 1,09 для Nb-Ta) могли быть получены из магнитных аномалий и аномалий Буге нижнего и среднего уровня. Буферные зоны границ гранитов также демонстрировали высокие и средние пространственные контрасты (1,03 для W, 1,02 для Sn, 0,84 для Nb-Ta). Осадочные породы показали средне-низкий пространственный контраст (0,60, 0,49, 0,21 для W, 0,71, 0,53, 0,25, 0,22 для Sn, 0,41, 0,35, 0,09 для Nb-Ta). Положительные пространственные контрасты зон гидротермально-метасоматических изменений подтвердили валидность процесса DPCA-IDD.

2.3. Прогнозирование.

Коллективное обучение (ELM) представляет собой комплекс отдельных обучающих методов и алгоритмов. Случайный лес (RF) представляет собой высоконадёжную систему распознавания, состоящую из ряда деревьев принятия решений (т.е. дерева классификации и регрессии (CART)), которые организованы иерархически с помощью набора правил. Он характеризуется начальной загрузкой, подмножествами переменных и интеграцией голосов (рис. 5),

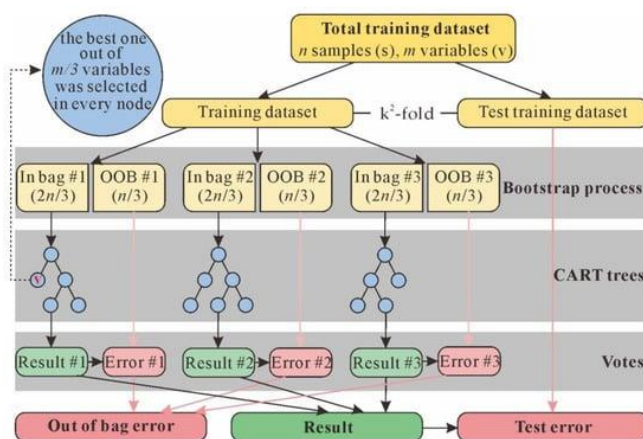


Рис. 5. Блок-схема алгоритма RF.

RF имеет преимущество в точности и способности к обобщению. Была использована 5-кратная перекрестная проверка для оценки общей ошибки классификации. Вместе они могут объединяться в 25 обучающих наборов и тестов (табл. 7).

Табл. 7.

Иллюстрация учебных и тестовых наборов данных для 5²-кратной перекрестной проверки.

No.	Training Sets of Positive Samples	Training Sets of Negative Samples	Test Training Sets of Positive Samples	Test Training Sets of Negative Samples
1	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_4$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_4$	S^+_5	S^-_5
2	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_4$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_5$	S^+_5	S^-_4
3	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_4$	$S^-_1, S^-_2, S^-_4, S^-_5$	S^+_5	S^-_3
4	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_4$	$S^-_1, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_5	S^-_2
5	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_4$	$S^-_2, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_5	S^-_1
6	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_4$	S^+_4	S^-_5
7	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_5$	S^+_4	S^-_4
8	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_4, S^-_5$	S^+_4	S^-_3
9	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_5$	$S^-_1, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_4	S^-_2
10	$S^+_1, S^+_2, S^+_3, S^+_5$	$S^-_2, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_4	S^-_1
11	$S^+_1, S^+_2, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_4$	S^+_3	S^-_5
12	$S^+_1, S^+_2, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_5$	S^+_3	S^-_4
13	$S^+_1, S^+_2, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_4, S^-_5$	S^+_3	S^-_3
14	$S^+_1, S^+_2, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_3	S^-_2
15	$S^+_1, S^+_2, S^+_4, S^+_5$	$S^-_2, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_3	S^-_1
16	$S^+_1, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_4$	S^+_2	S^-_5
17	$S^+_1, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_5$	S^+_2	S^-_4
18	$S^+_1, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_4, S^-_5$	S^+_2	S^-_3
19	$S^+_1, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_2	S^-_2
20	$S^+_1, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_2, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_2	S^-_1
21	$S^+_2, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_4$	S^+_1	S^-_5
22	$S^+_2, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_3, S^-_5$	S^+_1	S^-_4
23	$S^+_2, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_2, S^-_4, S^-_5$	S^+_1	S^-_3
24	$S^+_2, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_1, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_1	S^-_2
25	$S^+_2, S^+_3, S^+_4, S^+_5$	$S^-_2, S^-_3, S^-_4, S^-_5$	S^+_1	S^-_1

Кроме того, общая ошибка представлена средней ошибкой 25 обучающих наборов и тестов. Подмножество переменных означает, что для каждого узла дерева решений производится случайный выбор входных переменных, затем выбирается наилучшая переменная из случайного выбора переменных, а размер случайного выбора составляет часть от общего числа переменных. Объединение голосов означает, что окончательный результат RF основан на большинстве или среднем из результатов всех деревьев принятия решений. RF доказал свою эффективность для MPM и хорошо работает при меньшем количестве наборов обучающих выборок. Всего лишь 14 ~ 16 положительных участков были использованы в MPM на базе RF для разных районов с идеальными результатами. В MPM значения положительных участков всегда устанавливаются равными 1, в то время как отрицательные участки

устанавливаются равными 0. Для регрессионной миссии прогнозы представляют собой плавающие значения в диапазоне от 0 до 1, обозначающие вероятность залежей. Для целей классификации прогнозы могут быть разделены на перспективные и неперспективные районы, используя определенное пороговое значение.

В этом исследовании пакет “RF_MexStandalone_v0.02” был впервые применен к МРМ. В Руанде было «зонировано» приблизительно 26 000 квадратов размером 1×1 км, и значения квадратов, содержащих положительные или отрицательные участки, были установлены в 1 или 0 соответственно; квадраты, где присутствовали или отсутствовали переменные (т. е. слои-предсказатели), были установлены в 1 или 0 соответственно. Несколько деревьев решений и количество выбранных переменных для каждого узла являются необходимыми условиями для запуска RF. Ошибки всегда сходятся по мере увеличения количества деревьев, и RF менее чувствителен к количеству выбранных переменных по мере схождения ошибок. Следовательно, количество выбранных переменных было установлено равным 1/3 от общего количества переменных. 5⁻²-кратная перекрестная проверка была использована для разделения обучающего набора данных на обучающие и тестовые обучающие подмножества, и точность RFS с 50~1000 деревьями решений была обучена и протестирована с использованием обучающих и тестовых обучающих подмножеств, соответственно, затем было определено оптимальное количество деревьев решений в соответствии с ошибкой теста. Для регрессии вероятностей залежей W, Sn и Nb-Ta в каждом квадрате был применен RF с оптимальным количеством деревьев принятия решений соответственно. Кроме того, общий потенциал минерализации был рассчитан на основе вероятностей залежей W, Sn и Nb-Ta (уравнение (2)). Наконец, металлогенические пояса и перспективные районы были очерчены в соответствии с общим потенциалом минерализации и вероятностями залежей W, Sn и Nb-Ta соответственно.

$$P_T = (L_W + L_{Sn} + L_{Nb-Ta})/3 \quad (2)$$

где P_T представляет общий потенциал минерализации, L_W представляет вероятность месторождения W, L_{Sn} представляет вероятность месторождения Sn, а L_{Nb-Ta} представляет вероятность месторождения Nb-Ta.

3. Результаты

3.1. Показатели RF

Конфигурация параметров RF оказывает большое влияние на его способность к обобщению и эффективность. На рисунке 6а показана взаимосвязь между ошибкой теста и количеством деревьев, в то время как количество выбранных переменных было установлено равным 1/3 от общего количества переменных. Для примерно 700 деревьев ошибка стабилизировалась на уровне 0,268, 0,272 и 0,252 для минерализации W, Sn и Nb-Ta,

соответственно, колебание (в диапазоне от 0 до 1) составило менее 0,01. Добавление большего количества деревьев не уменьшило и не увеличило ошибку значительно, но увеличило время вычисления, и, следовательно, 700 деревьев были установлены в модели RF.

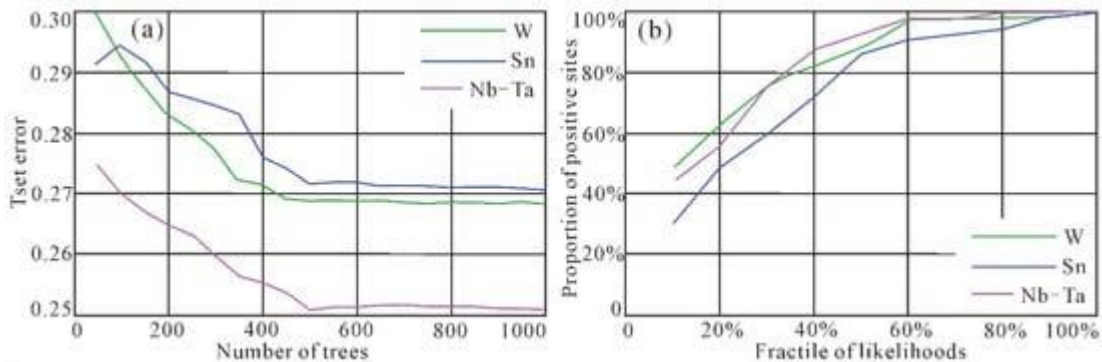


Рис. 6. (а) Кривые ошибок тестирования и (б) кривые эффективности захвата модели RF.

Кривые эффективности улавливания были получены для оценки эффективности RF-моделей минерализации W, Sn и Nb-Ta соответственно. Кривая была получена следующим образом: во-первых, все вероятности квадратов были ранжированы от наивысшей к наименьшей, и были рассчитаны 10 фрактилей квадратов; во-вторых, количество положительных участков (S_p) из общего количества положительных участков (S_T), связанных с верхней 10%, 20% ,..., 100% были записаны квадраты; наконец, доля положительных участков (S_p/S_T) в верхней 10%, 20%,...,100% были рассчитаны квадраты. На рисунке 6б показаны производные кривые эффективности улавливания модели RF, где ось x представляет фрактили квадратов, а ось y представляет долю положительных участков. Приблизительно 90% положительных участков связаны с 50% квадратами с наибольшей вероятностью при моделировании RF. В целом, модель RF для Nb-Ta имеет наилучшие показатели. Эти результаты также указывают на то, что модель RF создала разумное распределение вероятностей.

3.2. Металлогенические пояса и перспективные районы

Металлогенические пояса можно разделить на 5 уровней, среди которых I уровень соответствует глобальному масштабу, II уровень соответствует одному или нескольким тектоническим элементам, III уровень относится к региону, где минерализация сформировалась или контролировалась той же геологической деятельностью, IV уровень относится к подпоясу III уровня, а V уровень относится к рудному полю. Таким образом, семь металлогенических поясов IV уровня были очерчены в соответствии с распределением общего потенциала минерализации и региональной геологией (рис. 7а).

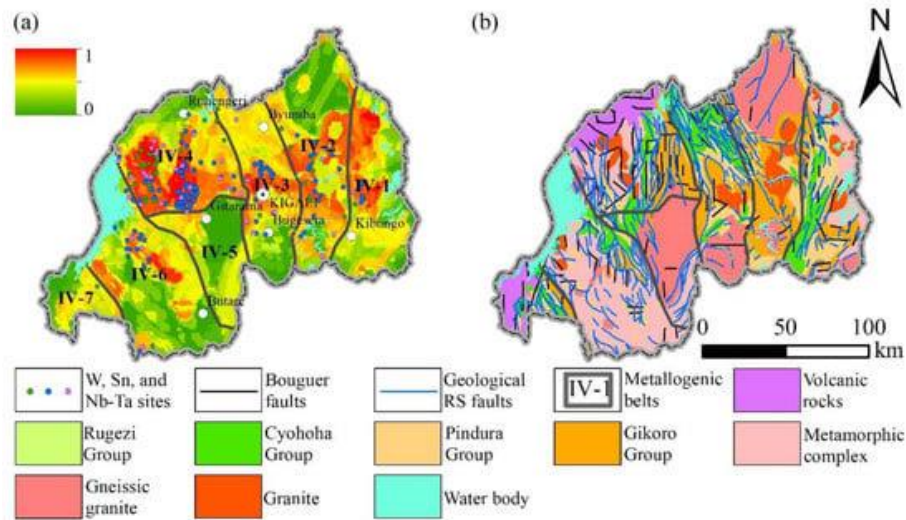


Рис. 7. (a) Общий потенциал минерализации и (b) геологические характеристики металлогенических поясов.

Пояс IV-1 со средним общим потенциалом минерализации 0,4526 расположен в восточной Руанде и включает в себя группу Сиохоха, группу Пиндура и группу Гикоро на западе и метаморфический комплекс на востоке, а также граниты в центре и на севере; разломы в основном ориентированы на NNE и SN, региональная антиклиналь может быть выявлена на среднем западе (рис. 7b, табл. 8), и несколько положительных участков были обнаружены вблизи антиклинали (рис. 7a).

Табл. 8.

Атрибуты металлогенических поясов.

Serial Number	Area (km ²)	Mean Total Mineralization Potential
IV-1	3687.56	0.4526
IV-2	4786.89	0.4559
IV-3	3420.35	0.4925
IV-4	4244.73	0.6013
IV-5	2265.03	0.2899
IV-6	5338.66	0.3295
IV-7	1338.03	0.3223

Пояс IV-2 со средним общим потенциалом минерализации 0,4559, расположенный на ближнем востоке, в основном обладает группой Гикоро на юге, а на севере и в середине имеются гнейсовые граниты; ориентированные на северо-запад разломы в основном существуют в группе Гикоро. В гнейсовых гранитах также имеются разломы северо-восточной ориентации (рис. 7b, табл. 8), и рядом с гранитами был обнаружен ряд положительных участков (рис. 7a). Пояс IV-3 со средним общим потенциалом минерализации 0,4925, расположенный в центральной Руанде, обладает группой Сиохоха, группой Пиндура и группой Гикоро на севере и в середине, а также гранитами в середине; разломы в основном ориентированы на северо-запад, за ними следуют обращенные к северо-востоку, региональная антиклиналь может быть идентифицирована в середине (рис. 7b, табл. 8), и был обнаружен ряд положительных участков вдоль гранитов и региональной антиклинали (рис. 7a). Пояс IV-4

с наилучшим средним общим потенциалом минерализации 0,6013 расположен на северо-западе Руанды; он обладает группами Сиохоха и Гикоро на востоке и метаморфическим комплексом на западе, а в средней части пояса имеются граниты, а на западе - гнейсовые граниты; разломы в основном ориентированы по SN (рис. 7b, табл. 8), и большое количество положительных участков было обнаружено в центре и на западе (рис. 7a). Пояс IV-5 с наименьшим средним общим потенциалом минерализации 0,2899, расположенный на юго-западе Руанды, в основном обладает группой Сиохоха на севере и метаморфическим комплексом на юге, а в середине имеются крупномасштабные месторождения гнейсового гранита; разломы в основном ориентированы на северо-запад, NNE и существуют вдоль границ гнейсового гранита (рис. 7b, табл. 8). Кроме того, в этом поясе не было обнаружено положительных участков (рис. 7a). Пояс IV-6 со средним общим потенциалом минерализации 0,3295, расположенный на юго-западе Руанды, в основном обладает метаморфическим комплексом, за которым следуют группа Сиохоха, группа Гикоро на востоке и рассеянная группа Пиндура, на северо-западе есть граниты, а в центре - гнейсовые граниты; разломы в основном ориентированы на северо-запад и SN (рис. 7b, табл. 8), на севере и юге было обнаружено несколько положительных участков (рис. 7a). Пояс IV-7 со средним общим потенциалом минерализации 0,3223, расположенный в западной Руанде, включает в себя группу Сиохоха, группу Пиндура и группу Гикоро на востоке и кайнозойские вулканические породы на западе; разломы в основном ориентированы на северо-запад (рис. 7b, табл. 8), только один участок W был обнаружен вблизи пояса IV-6 (рис. 7a).

Верхние 10%, 20% и 30% квадратов были классифицированы как регионы с более высокой, средней и низкой вероятностью, соответственно (рис. 8).

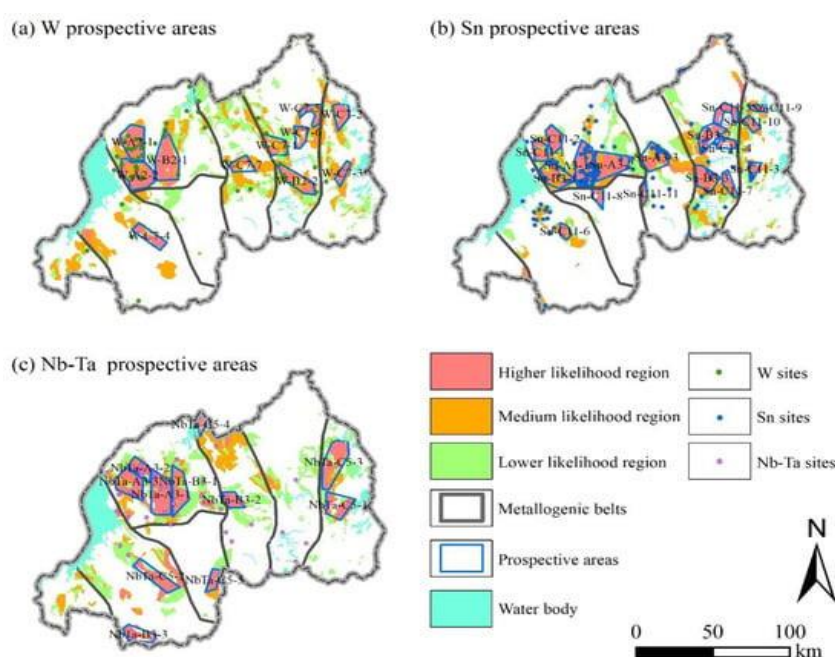


Рис. 8. Перспективные районы W, Sn и Nb-Ta в Руанде. (a) Перспективные районы минерализации W; (b) перспективные районы минерализации Sn; (c) Перспективные районы минерализации Nb-Ta.

Перспективные районы для W, Sn, Nb-Ta были очерчены вдоль границ регионов с более высокой вероятностью в пределах металлогенических поясов, и они были классифицированы на уровни А, В и С в соответствии с положительными участками, пространственной непрерывностью, средней вероятностью залежей и площадями. В качестве результатов этого картирования были определены 2 перспективных участка уровня А, 2 уровня В и 7 перспективных участков уровня С для W (рис. 8а), 3 перспективных участка уровня А, 3 В и 11 перспективных участков уровня С для Sn (рис. 8b), 3 перспективных участка уровня А, 3 В и 5 перспективных участков уровня С для Nb-Ta (рис. 8с). Они в основном расположены на среднем западе (IV-4) и востоке (IV-2, IV-1) Руанды (табл. 9, 10 и 11).

Табл. 9.

Характеристики перспективных районов W.

Serial Number	Area (km ²)	Mean Likelihood of Deposits
W-A2-1	314.64	0.9074
W-A2-2	342.99	0.8835
W-B2-1	402.35	0.8841
W-B2-2	224.33	0.8217
W-C7-1	165.97	0.8086
W-C7-2	135.97	0.8964
W-C7-3	76.18	0.8348
W-C7-4	162.62	0.7704
W-C7-5	108.67	0.8083
W-C7-6	102.57	0.7389
W-C7-7	124.62	0.7884

Табл. 10.

Характеристики перспективных районов Sn.

Serial Number	Area (km ²)	Mean Likelihood of Deposits
Sn-A3-1	321.54	0.9105
Sn-A3-2	330.57	0.8942
Sn-A3-3	251.61	0.8684
Sn-B3-1	249.88	0.8888
Sn-B3-2	200.76	0.8225
Sn-B3-3	189.22	0.9125
Sn-C11-1	121.87	0.8841
Sn-C11-2	144.26	0.9138
Sn-C11-3	64.31	0.8541
Sn-C11-4	78.64	0.7577
Sn-C11-5	133.77	0.7942
Sn-C11-6	59.08	0.9005
Sn-C11-7	96.98	0.8245
Sn-C11-8	68.02	0.8190
Sn-C11-9	48.30	0.9059
Sn-C11-10	63.60	0.8716
Sn-C11-11	49.01	0.8302

Характеристики перспективных районов Nb-Ta.

Serial Number	Area (km ²)	Mean Likelihood of Deposits
NbTa-A3-1	353.93	0.8832
NbTa-A3-2	137.55	0.8984
NbTa-A3-3	271.84	0.8612
NbTa-B3-1	262.62	0.8302
NbTa-B3-2	112.05	0.8645
NbTa-B3-3	167.10	0.7061
NbTa-C5-1	236.08	0.7877
NbTa-C5-2	236.88	0.7682
NbTa-C5-3	370.46	0.8315
NbTa-C5-4	60.29	0.7910
NbTa-C5-5	86.28	0.7525

Разница между предыдущим исследованием и этим исследованием может быть вызвана тем, что предыдущее исследование основывалось на знаниях и проводилось исключительно с использованием данных о магнитных аномалиях высокого разрешения, в то время как это исследование основывалось на комплексном анализе данных.

4. Обсуждение

Чтобы продемонстрировать возможность составления карты перспективности с использованием слоев-критериев, был получен ряд вторичных данных, включая разломы, карту плотности разломов, карту геофизических аномалий и данные об изменениях минералов. Затем были применены RF-модели с 700 деревьями регрессии для проведения процесса MPM, в котором известные положительные и отрицательные участки были установлены равными 1 и 0 соответственно. Это означает, что окончательная карта перспективности также варьируется от 0 до 1, и большее значение представляет большую вероятность рудных объектов. Точность моделей RF с использованием данных была представлена тестовыми ошибками с использованием 25 обучающих наборов (т.е. 5²-кратной перекрестной проверки). Результаты показали, что ошибки составили около 0,268, 0,272 и 0,252 для W, Sn и Nb-Ta MPM соответственно (рис. 6а), и примерно 90% положительных участков были охвачены верхними 50% квадратами с наибольшей вероятностью (рис. 6б). Показатели MPM в этом исследовании с использованием данных не были идеальными, но они подтвердили достоверность данных в региональном количественном MPM, помогли получить общую картину потенциала минерализации и дополнительно определили поисковые перспективы в исследуемой области.

Маскировка густой растительностью на дистанционных материалах может предоставлять только фрагментированные изображения. Для уменьшения негативного воздействия «пустых»

участков был предложен дополнительный процесс интерполяции–плотности–разграничения (IDD) на карте изменений. Процесс IDD заполняет замаскированные области с помощью интерполяции, а надежность интерполированной карты оценивается с помощью карты плотности пикселей. Затем диапазон карты плотности был расширен до 0,5~1,0, чтобы представить переход от бывшей пустой области к нетронутой области, соответственно, затем была восстановлена новая карта изменений с произведением интерполированной карты изменений и карты плотности. В этом исследовании изменения гетита, иллита и кварца (рис. 3i) были получены с помощью процесса DPCA-IDD. Были показаны приемлемые контрасты, за исключением изменения кварца в Sn MPM (с контрастом 0,06). Это может быть объяснено совпадением Nb-Ta-Sn пегматита и Sn кварцевой жилы, а контраст между минерализацией кварца и Sn был уменьшен за счет Sn, сохранившегося в пегматитах.

Как видно из рисунка 7а, Пояс IV-4 с большим набором месторождений W, Sn и Nb-Ta и наилучшим средним потенциалом минерализации (табл. 8), в основном обладает перспективными участками уровня А и В; в то время как перспективные участки уровня В и С занимают лидирующие позиции в IV-2, IV-1 и других поясах, они соответствуют принципу MPM, основанного на данных: большее количество отложений указывает на лучшие металлогенические условия. Существует высокая вероятность того, что в перспективных районах уровня А месторождения все еще не открыты. В первую очередь рекомендуется дополнительные поиски рядом и под известными месторождениями в районах уровня А, в то время как перспективные районы уровня В и С могут выступать в качестве будущих поисковых площадей.

5. Выводы

1. Был проведен региональный количественный MPM с использованием интегрированной информации, для заполнения пробела в поисковых работах. Снимки Landsat 8 OLI были применены для выявления разломов и изменений минералов посредством процесса DPCA-IDD.

2. 2-километровые буферные зоны и высокая плотность геологических разломов дистанционного зондирования демонстрировали средний или высокий контраст с известными месторождениями, в то время как изменения минералов в основном обладали средним контрастом (табл. 6).

3. MPM оказался действенным, а выделенные металлогенические пояса и перспективные районы пополняют потенциал минерализации W, Sn, Nb-Ta.

4. Процесс IDD является подходящим методом для получения карты пространственно непрерывных изменений на замаскированных изображениях. k^2 -кратная перекрестная

проверка может привести к более разумным ошибкам тестирования, чем k -кратная перекрестная проверка.

3. ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ RZM методом LIBS с использованием интервала PLS *м-ния Норра-Карр, Олсерум (Швеция) и Фен-Комплекс (Норвегия)*

Введение.

Редкоземельные элементы (REE) используются в широком спектре современных технологий, которые включают, например, технологии возобновляемых источников энергии, коммуникационные технологии и нефтехимию. Лантан и неодим важны, например, для обеспечения электрической подвижности, а также для оптимизации свойств материалов стальных сплавов в сочетании с церием. В будущем диоксид циркония, стабилизированный иттрием, будет применяться в качестве электролитного материала в топливных элементах. Эти разнообразные применения, особенно в высокотехнологичных отраслях, стимулируют глобальный спрос на РЗЭ. В то время как в 2013 году потребность в REE в важных будущих технологиях составляла около 30 900 тонн, исследования прогнозируют увеличение спроса до 70 900 тонн к 2035 году. Из-за растущего спроса РЗЭ являются важными ресурсами. Вопреки своему названию, они широко распространены в земной коре в виде микроэлементов. Из-за химического сходства элементы с соседними атомными номерами могут заменять друг друга в кристаллических структурах различных минералов. Наиболее экономически важными минералами, содержащими РЗЭ, являются карбонаты и фосфаты, такие как монацит, ксенотим, бастнезит или паризит. Внутри минералов пропорции различных РЗЭ различаются. Легкие РЗЭ (LREE), все элементы от лантана до европия, преобладают главным образом в бастнезите и монаците, тогда как ксенотим является источником тяжелых РЗЭ (HREE), от гадолиния до лютеция и иттрия. Это распределение зависит от месторождения, его формирования и типа. Хотя во всем мире существует большое количество полезных ископаемых, богатых РЗЭ, добыча в настоящее время сосредоточена только на нескольких месторождениях и минералах. Добыча этих ресурсов является сложной задачей, но переработка продуктов, содержащих РЗЭ, также сложна. Помимо вышеупомянутых проблем и истощения текущих месторождений, в будущем ожидаются проблемы с доступностью РЗЭ. Крупнейшие в мире месторождения расположены в Китае. В настоящее время Китай является лидером мирового рынка по производству РЗЭ. Помимо других азиатских стран, несколько тысяч тонн РЗЭ добывается в год Австралией, США и Россией. На сегодняшний день в Европе не разрабатывается ни одно из существующих месторождений РЗЭ. Экономически значимые месторождения можно найти в основном в Скандинавии, особенно в Швеции и Финляндии. Эти потенциальные районы добычи имеют повышенное содержание РЗЭ и могут покрыть поставки в Европу. В то же время, разведка новых месторождений РЗЭ приобретает все большее значение для обеспечения поставок в

будущем. Разведка требует быстрых, экологических и экономически эффективных аналитических методов, с одной стороны, для минимизации количества материала для отбора проб и, следовательно, химической и геологической лабораторной работы, а с другой стороны, для снижения затрат. Наиболее распространенными методами обнаружения и анализа РЗЭ являются масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), спектрометрия оптической эмиссии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES), рентгено-флуоресцентный (XRF) и нейтронно-активационный анализ (NAA). Однако большинство этих методов отнимают много времени и, следовательно, дороги, например, из-за подготовки образцов. Кроме того, почти все эти методы требуют предварительного отбора проб для анализа в лаборатории. Спектроскопия лазерно-индуцированного пробоя (LIBS) - это метод, который позволяет проводить быстрый анализ на месте в режиме реального времени. Кроме того, практически не требуется подготовка образцов, поскольку твердые, жидкие и газообразные образцы могут быть проанализированы в широком спектре матриц. По сравнению с РФА можно измерить все элементы периодической системы, включая и более легкие элементы.

В LIBS лазерное излучение используется для генерации плазмы на поверхности образца. Результирующее излучение позволяет анализировать исследуемые образцы на основе спектральных сигнатур характерных элементов. Хотя РЗЭ имеют многочисленные линии излучения, обнаружение и анализ элементов затруднены из-за спектральных помех матриц и низких концентраций РЗЭ. LIBS часто используется для качественного анализа элементов или для классификации минералов. Количественный анализ основан на одномерных и/или многомерных методах. Количественная оценка методом одномерной регрессии (UVR) часто затруднена, особенно в гетерогенных материалах, поскольку могут возникать многочисленные химические и физические эффекты сложной матрицы. В отличие от одномерных методов, использование многомерных методов для количественной оценки может исправить эту ситуацию. В то время как одномерная регрессия включает в количественную оценку только отдельные пики спектра, методы многомерного анализа, такие как регрессия с частичными наименьшими квадратами (PLS), могут включать весь спектр или, путем выбора переменных, только часть спектра. В случае применения всего спектра в PLS-регрессии регрессионная модель содержит шум и избыточную информацию. Это может оказать негативное влияние на результаты прогнозирования. Альтернативой является сокращение общего спектра до отдельных частичных спектров, которые содержат наиболее важную информацию путем выбора переменных. Это потенциально может улучшить прогностическую способность модели. Одним из таких методов является интервальная регрессия с частичными наименьшими квадратами (*i*PLS). В этом методе весь спектр делится на спектральные

интервалы одинакового размера. Из полученных спектральных подобластей предоставляется и обобщается соответствующая информация, что облегчает фокусировку на важных спектральных областях и устранение помех из других регионов. Регрессия PLS выполняется для одного спектрального интервала для каждого элемента. Ширина этих интервалов может варьироваться. В случае широких интервалов *i*PLS-регрессия напоминает обычную многомерную PLS-регрессию. Однако, если интервалы становятся меньше, регрессию *i*PLS можно считать автоматическим UVR. Регрессия *i*PLS впервые была использована в ИК-спектроскопии, но также находит применение в других спектроскопических методах, таких как LIBS для почв.

Настоящая работа посвящена использованию LIBS для разведки новых месторождений РЗЭ. Целью является количественный скрининг REE в минералах, горных породах и почвах в окрестностях потенциального месторождения REE с использованием LIBS и одномерной и многомерной *i*PLS регрессии. В этом исследовании исследуются образцы минералов, горных пород и почвы из скандинавских месторождений Норра-Карр и Олсерум в Швеции и Фен-Комплекс в Норвегии. Их элементное содержание определялось с помощью эталонного анализа (ICP-OES и XRF). Относительно небольшое количество исследованных образцов является результатом высоких затрат на отбор проб, транспортировку и эталонный анализ. Эта проблема сопровождает геологов в их повседневной работе и используется в данном исследовании для демонстрации потенциала наших методов. Для характеристики влияния матричных эффектов сравниваются образцы синтетических РЗЭ, полученные из хлоридных солей РЗЭ в серпентините, и модельная почва, а также полевые образцы. Все образцы анализируются на содержание элементов церия (Ce), лантана (La), неодима (Nd) и иттрия (Y). Результаты анализа с помощью LIBS оцениваются с помощью UVR и регрессии *i*PLS.

1. Материалы и методы.

1.1. Образцы и эталонный анализ.

Всего было проанализировано 167 образцов, содержащих РЗЭ. Из них 122 были искусственными образцами (далее именуемыми синтетическими) и 45 были естественными образцами (далее именуемыми полевыми). В обоих случаях было проведено дополнительное различие между образцами породы и почвы. Все образцы были доступны в виде измельченных порошков.

1.1.1. Геологический обзор месторождений.

Полевые образцы были собраны на трех разных месторождениях в Швеции и Норвегии. 19 из этих образцов были взяты на месторождении Олсерум-Юпвал РЗЭ на юго-востоке Швеции. Отобранные обнажения расположены примерно в 7 км к северо-западу от

региона Гэмблебю Вестервик (рис. 1а). Богатые фосфатами РЗЭ дайки пересекают метаосадочные породы (кордиеритоносные гнейсы). Фосфаты включают монацит (LREE), ксенотим (Y, HREE) и фторапатит (LREE). Кроме того, встречаются алланит (силикат РЗЭ) и карбонаты РЗЭ, бастнезит и синхизит-Се. Богатые РЗЭ-фосфатом дайки толщиной до 2 м встречаются вблизи контакта с гранитоидами Транскандинавского магматического пояса (около 1,85-1,65 млрд лет назад в метаосадочной формации Вестервик. Образцы взяты из двух даек, расположенных на расстоянии около 150 м.

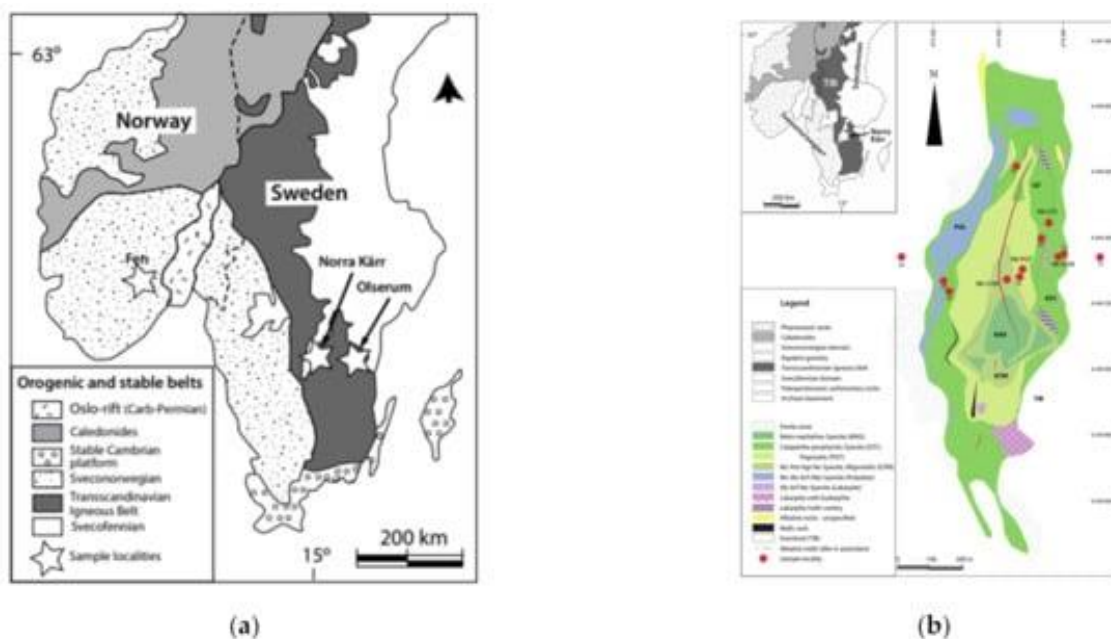


Рис. 1. Карты (а) всех исследованных месторождений и (б) мест отбора проб в Норра-Карре, Швеция.

Комплекс Норра-Карр представляет собой небольшую магматическую интрузию с “агпайтовым составом”, т.е. $(Na+K) > Al$. Комплекс имеет эллиптическую форму протяженностью с севера на юг около 1300 м и протяженностью с востока на запад около 500 м (рис. 1а, б). Комплекс Норра-Карр (возраст около 1,5 млрд лет внедрился в магматические породы Транскандинавского магматического пояса (около 1,8–1,7 млрд лет). По существу, он состоит из различных типов нефелиновых сиенитов. Исходные плутонические породы демонстрируют признаки сильной деформации и метаморфического наложения. Тектоно-метаморфическая структура относится к свекло-норвежской орогении (около 1048 г. н.э.). Толща породы известна как месторождение циркония из-за высокого содержания минералов, богатых Zr. Основными минералами, содержащими РЗЭ, являются силикаты эвдиалит, катаплеит и церит. Эвдиалит встречается как магматический тип, бедный РЗЭ, и вторичный (метаморфический) тип, богатый HREE, который является основной фазой, содержащей РЗЭ. Проанализированные образцы породы и почвы взяты из разных частей интрузии, с немного отличающимся составом. Концентрации REE в породах составляют до 1 мас.%. Кроме того, в качестве эталона были взяты пробы за пределами интрузии (подпочва и

верхний слой почвы № 20). Другой образец, полученный к востоку от интрузии, был загрязнен гидротермальными флюидами, так называемой фенитизированной породой. Всего было исследовано 17 образцов из Norga Kått.

Комплекс Fen, расположенный в провинции Телемарк на юге Норвегии, представляет собой раннекембрийский магматический интрузивный комплекс. В нем преобладают карбонатиты, образованные из карбонатных расплавов. Комплекс имеет обнажение площадью около 10 км². Предыдущие карбонатитовые расплавы внедрились в мезопротерозойские гнейсы (рис. 1а). Карбонатиты переслоены щелочными ультраосновными силикатными породами, т.е. содержащими <40% SiO₂. Все расплавы образуются из более глубокого мантийного источника. Углеродистые интрузии модифицировали окружающие гнейсы потоками, богатыми CO₂, что привело к щелочным метасоматическим реакциям. Следовательно, комплекс Fen является типичным местом “процесса фенитизации”. Комплекс Fen известен своими высокообогащенными концентрациями тория и редкоземельных элементов. Основными минералами, содержащими РЗЭ, являются монацит [(LREE,Th)PO₄], бастнезит [(LREE)CO₃F] и паризит [Ca(LREE)₂(CO₃)₃F₂].

Эталонный анализ для РЗЭ церия, лантана и неодима был проведен методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) и рентгенофлуоресцентной спектроскопии (XRF-спектроскопия) для иттрия. Образцы были доступны в виде измельченных порошков. Для измерения LIBS все порошки были спрессованы в гранулы.

1.1.2. Подготовка синтетических образцов.

Синтетические образцы были подготовлены стандартным добавлением РЗЭ, используемые в виде гидратов хлоридов (CeCl₃·7H₂O, LaCl₃·7H₂O, NdCl₃·6H₂O, YCl₃·6H₂O), смешивали с соответствующими матрицами, почвой и породой. Для образцов в породе использовалась измельченная смесь серпентинита и коры выветривания. Матрица, используемая в почвенных образцах, представляет собой почву, содержащую лесс из Центральной Европы. Взвешенные образцы горных пород смешивали с 3 мас% дистиллированной воды, гомогенизировали в мельнице и прессуют в гранулы. Образцы почвы были только гомогенизированы и спрессованы в гранулы. Для одной гранулы используется 3 г образца. Гранулы готовили отдельно для каждого REE и концентрации: было приготовлено 16 гранул для Ce и Nd и 15 гранул для La и Y соответственно. Кроме того, гранулы, содержащие пустую породу и почву, были подготовлены для предварительных измерений, но не были задействованы в регрессиях *i*PLS. Концентрации РЗЭ в серпентините и почве были намного меньше 10 ppm.

1.2. Инструментальная настройка LIBS и параметров измерения.

Образцы размещались на вращающемся и линейно перемещающемся столе для отбора проб, в результате чего получалась спиралевидная схема измерения. Это обеспечивало свежую поверхность гранулы при каждой абляции. Свет Nd: YAG-лазера (Bernoulli LIBS, Litron Lasers, Регби, Англия, Великобритания, $\lambda = 1064$ нм, $E = 20$ МДж, частота повторения 10 Гц) фокусировался линзой (фокусное расстояние 50 мм) и создавал плазму на поверхности образца. Излучение собирали вогнутым зеркалом (ME-OPT-0007, Andor Technology, Белфаст, Северная Ирландия, Великобритания, фокусное расстояние 52 мм, $\lambda = 200-1100$ нм) и фокусировали по оптическому волокну для направления излучения на спектрометр echelle (Argelle Butterfly, LTB, Берлин, Германия). Два диапазона длин волн (УФ-диапазон: 190-330 нм, видимый диапазон: 275-750 нм) спектрометра измерялись отдельно с разрешением 20-30 пм (время задержки 2 мкс). Спектрометр был оснащен камерой ICCD (iStar, AndorTechnology, Белфаст, Великобритания) в качестве детектора (ширина затвора 10 мкс). В общей сложности было зарегистрировано около 230 спектров на образец как в УФ, так и в видимой областях. Для каждого спектра было накоплено 10 отдельных снимков.

1.3. Обработка и анализ данных одномерными и многомерными методами.

Origin (OriginLab, Нортгемптон, Массачусетс, США) использовался для одномерного анализа. Matlab (версия 2019b, MathWorks, Натик, Массачусетс, США) использовался для предварительной обработки и многомерных методов PCA и регрессии *i*PLS.

Спектры были предварительно обработаны коррекцией фона и нормализацией стандартного нормального изменения (SNV). Для коррекции фона использовался фильтр top-hat. Используемая длина структурного элемента в 20 точек данных соответствует ширине фильтра приблизительно 0,26 нм. Нормализация SNV последовала за коррекцией фона. Для нормализации SNV среднее значение всего спектра вычиталось из спектра, а разница была разделена на стандартное отклонение. После обработки данных с использованием коррекции фона и нормализации SNV 230 спектров были усреднены таким образом, чтобы в конечном итоге был получен один спектр для каждого исследованного образца.

Для одномерной регрессии для каждого исследованного РЗЭ был идентифицирован один пик, специфичный для конкретного элемента, а площадь пика (A) определялась путем интегрирования каждого из 230 спектров и последующего вычисления среднего значения и стандартного отклонения. Площадь пика была нанесена на график в зависимости от концентрации. Анализ основных компонентов был выполнен на необработанных спектрах полевых и синтетических образцов.

Для *i*регрессии PLS использовали *i*Toolbox от Nørgaard. 230 спектров были усреднены до *i*PLS, и для каждого элемента была выполнена отдельная *i*PLS, причем единственными

входными переменными были концентрации рассматриваемого элемента. Перекрестная проверка выполнялась внутри алгоритма *i*PLS, а также внешняя проверка с использованием тестовых данных, исключенных из алгоритма. Регрессия *i*PLS была основана на выборе переменных в спектральных интервалах. Количество интервалов варьировалось, максимум 5000 интервалов. Разделение интервалов выполнялось по необработанным данным о длине волны. Из-за способа преобразования данных *echelle* из 2D в (стандартное) 1D представление это привело к получению интервалов с разной шириной спектра (но постоянным количеством точек выборки). Точное количество интервалов и количество компонентов определялись индивидуально для каждого образца (таблицы 4 и 5) путем систематического изменения длины интервала. Был выбран номер интервала, который привел к интервалу с наименьшим RMSE. Регрессия PLS была выполнена с этим интервалом. Проверка результатов регрессии *i*PLS была выполнена путем 5-кратной перекрестной проверки с систематическим исключением.

2. Результаты.

2.1. Структура спектров РЗЭ.

LIB-спектры минералов, содержащих РЗЭ, очень сложны из-за насыщенности линий РЗЭ. База данных NIST LIBS отображает, например, 7723 строки для церия. Кроме того, РЗЭ часто встречаются в сочетании с другими РЗЭ. Кроме того, сильные линии излучения других элементов окружающей матрицы вносят вклад в сложность спектров. Типичный спектр LIB минерала, содержащего РЗЭ, и увеличенный частичный спектр показаны на рисунке 2.

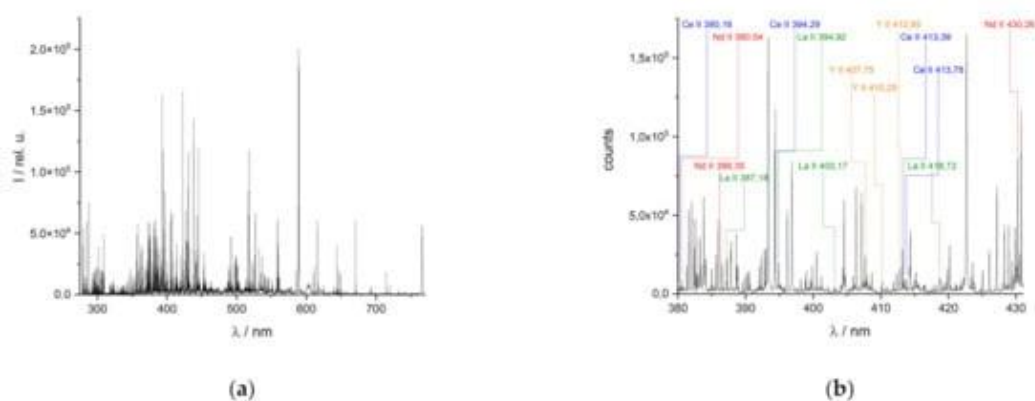


Рис. 2. Репрезентативный LIB-спектр монацит-ксенотим-апатитоносной жилы: (а) весь спектр ($\lambda = 275\text{-}750$ нм) и (б) частичный спектр ($\lambda = 380\text{-}430$ нм) с важными линиями излучения РЗЭ.

Вследствие большого количества линий излучения от разных элементов могут частично или даже полностью накладываться друг на друга. Это усложняет присвоение линий многочисленным элементам, особенно в спектрометрах с более низким разрешением. Использование спектрометров высокого разрешения может уменьшить эти проблемы при линейной оценке (рис. 3). По сравнению со спектрами с разрешением ≥ 100 нм

спектры с более высоким разрешением могут быть получены спектрометрами на основе эшелле-решеток, что позволяет наблюдать пики с лучшей разрешающей способностью. Используемый здесь спектрометр *echelle* имеет спектральное разрешение около 25-30 мкм в видимом диапазоне.

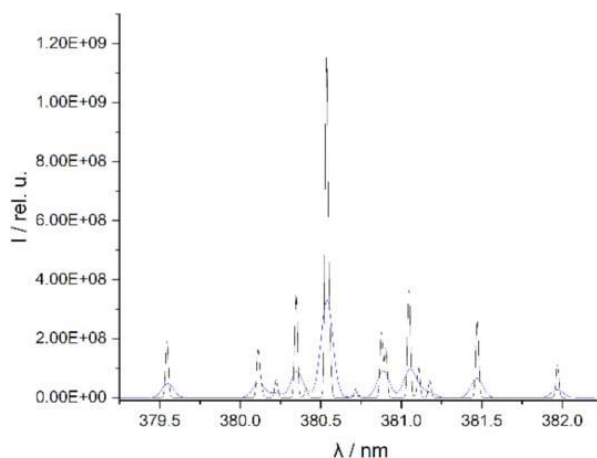


Рис. 3. Спектры Nd (пик элемента при 380,5 нм), смоделированные на основе базы данных NIST со спектральным разрешением 100 мкм (синяя линия) и 25 мкм (черная линия).

Улучшенное разрешение спектров позволяет отделять частично наложенные линии в приборах с более низким разрешением и обеспечивает более точное расположение линий. Это позволяет идентифицировать многочисленные линии REE с использованием базы данных NIST (рис. 2b). Идентифицированные линии излучения затем могут быть использованы в количественном элементном анализе с помощью LIBS. Двумя примерами неразрешенных особенностей в моделируемом спектре с низким разрешением (разрешение 100 мкм) Nd на рисунке 3 являются линейчатый триплет при 381,05 нм, который может быть полностью разрешен в моделируемом спектре с высоким разрешением, который имитирует спектр спектрометра эшелле (разрешение 25 мкм), и дуплет при 380,9 нм, который может быть разрешен только частично даже в спектрометре эшелле. Линии REE, которые перекрывают линии элементов матрицы, непригодны для исследования. Эти строки, отмеченные звездочкой в таблице 1 ниже, не включены в анализы, выполненные в этой работе. Другие перечисленные спектральные линии использовались в одномерной и многомерной регрессии.

Табл. 1.

Species	Spectral Lines
Ce II	380.15 nm, 394.27 nm *, 413.38 nm, 413.76 nm
La I	418.73 nm *
La II	387.16 nm *, 394.91 nm, 403.16 nm
Nd II	380.53 nm, 386.34 nm, 430.22 nm *
Y I	410.24 nm, 407.73 nm *, 412.82 nm

Экспериментальные спектральные линии проанализированных РЗЭ (показаны на рисунке 2b), использованные в этой работе, собраны с помощью спектрометра *echelle*. Длины волн излучения, отмеченные звездочкой (*), в этой работе не используются.

2.2. Одномерная регрессия.

РЗЭ не встречаются в природе в виде самородных металлов. Скорее, они встречаются в различных породообразующих минералах [Ce, La, Nd, Y]. В результате полевые образцы представляют собой сложные смеси самых разнообразных элементов [La, Ce, Nd, Y]. Для оценки влияния матричных элементов на ЛВ-спектры РЗЭ был выполнен одномерный регрессионный анализ наборов данных синтетических и полевых образцов, полученных экспериментальным путем. В то время как матрица образцов синтетических РЗЭ (одной породы или почвы) постоянна, РЗЭ в полевых образцах встроены в различные минералы, породы или почвы. Образцы в этой работе содержат Ce, La, Nd и Y в разных концентрациях. Для каждого исследованного РЗЭ был выполнен регрессионный анализ до 3 линий излучения. Приведены соответствующие коэффициенты определения (R^2) и пределы обнаружения (LOD). LOD представляет собой частное, в три раза превышающее стандартное отклонение базовой линии и наклон полученной линии регрессии. Результирующие значения LOD приведены в таблице 2.

Табл. 2.

Результаты одномерной регрессии синтетических образцов РЗЭ (Ce, La, Nd, Y) в горных породах и почве: длина волны, LOD и R^2 лучших и других проанализированных линий РЗЭ.

Species	λ /nm	LOD/ppm	R^2	Species	λ /nm	LOD/ppm	R^2
in rocks				best results			
Ce II	413.76	115	0.91	Ce II	413.38	120	0.90
La II	379.08	3180	0.99	Ce II	456.23	130	0.90
Nd II	386.34	158	0.98	La II	399.57	7700	0.99
Y I	412.82	61	0.97	La II	433.37	3500	0.99
				Nd II	380.53	28500	0.91
				Y I	410.24	65	0.97
				Y II	488.36	50	0.97
in soils				other lines			
Ce II	413.76	285	0.99	Ce II	413.38	290	0.98
La II	404.29	160	0.97	Ce II	456.23	270	0.99
Nd II	386.34	414	0.96	La I	550.13	210	0.95
Y II	488.36	227	0.98	La I	624.99	200	0.95
				Y II	363.31	270	0.95
				Y II	437.49	290	0.94

Использовались только спектральные линии, которые встречаются во всем исследованном диапазоне концентраций. Поскольку для каждого элемента также встречаются неподходящие линии (табл. 1), для анализа в разных матрицах использовались разные линии излучения. В исследованных полевых образцах содержание REE варьируется на несколько порядков величины (от 1 ppm до 3%). Поэтому представление линий регрессии лучше всего выполнять с помощью двойного логарифмического графика, чтобы охватить весь диапазон

концентраций. Все исследованные линии сведены в таблицу 2 с соответствующими коэффициентами определения и LOD.

2.2.1. Одномерная регрессия синтетических образцов.

Для образцов синтетических РЗЭ горных пород функции UVR линии Ce при 413,76 нм и линии Nd при 386,34 нм показаны на рисунке 4 в качестве примеров. Оба элемента показывают наилучшие результаты регрессии на этих линиях излучения с точки зрения линейности, которая составляет $R^2 = 0,91$ для Ce и $R^2 = 0,98$ для Nd. Другие изученные РЗЭ, La и Y, также имеют хорошие коэффициенты определения на выбранных длинах волн: R^2 (La при 379,08 нм) = 0,99 и R^2 (Y при 412,82 нм) = 0,97.

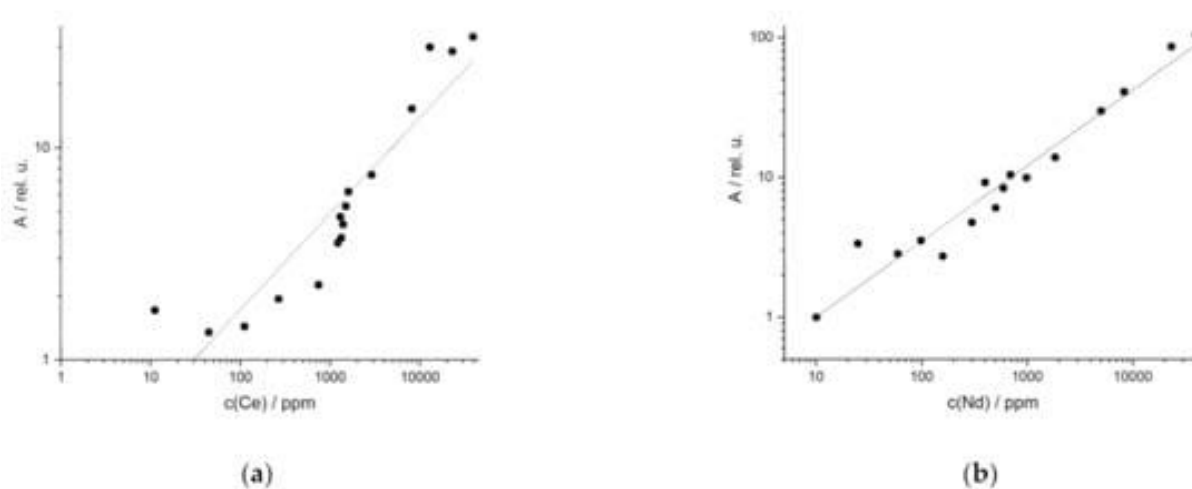


Рис. 4. Одномерная регрессия синтетических образцов в породе от (a) Ce (R^2 (413,76 нм) = 0,91) и (b) Nd (R^2 (386,34 нм) = 0,98).

Результаты UVR, полученные для синтетических образцов в почвах, были аналогичны синтетическим минералам, хотя линии излучения отличались. Примерами являются результаты для REE Ce и Y в почвах (рис. 5). Для Ce использовалась линия излучения при 413,76 нм, а для Y - линия при 488,36 нм соответственно. Оба имеют высокие коэффициенты определения (R^2 (Ce) = 0,99, R^2 (Y) = 0,98). Коэффициенты $R^2 > 0,96$ были также получены для UVR элементов La (404,29 нм) и Nd (386,34 нм). Другие описанные линии РЗЭ в горных породах и почве также дают хорошие результаты, но они демонстрируют пониженную линейность, о чем свидетельствует меньший R^2 ($R^2 = 0,90-0,99$, табл. 2). Пределы обнаружения РЗЭ в горных породах и почве одинаковы для большинства элементов. Их среднее значение LOD составляет 200 ppm (за исключением La в горных породах, которые показали необычно высокое значение LOD в результате большого разброса точек данных, что, скорее всего, связано с матричными эффектами) со стандартным отклонением 110 ppm. Тем не менее, значения LOD варьируются между элементами и даже между матрицами для одного элемента, иногда значительно.

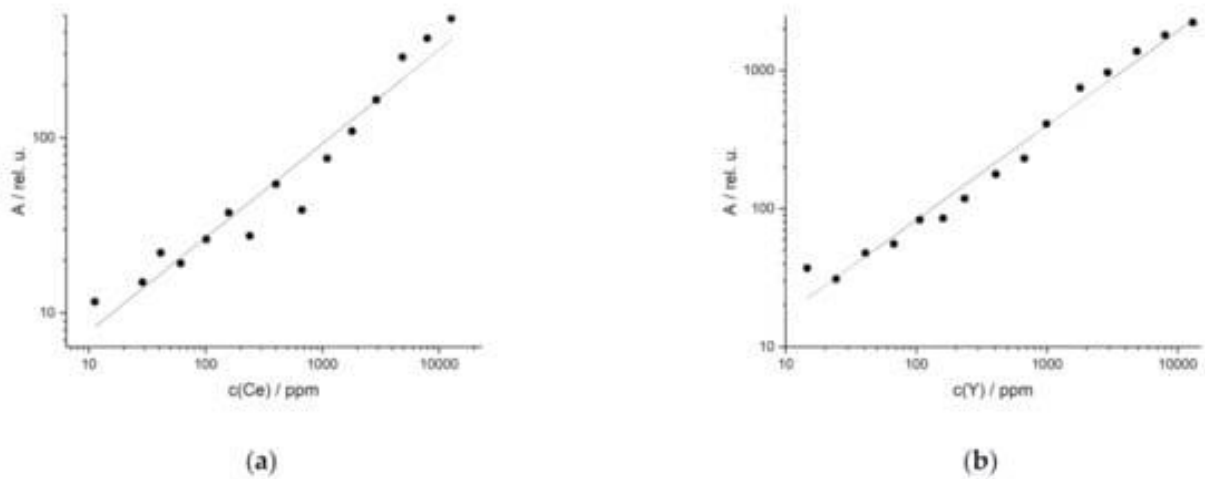


Рис. 5. Одномерная регрессия синтетических образцов в почве
(а) Ce (R^2 (413,76 нм) = 0,99) и (б) Y (R^2 (488,36 нм) = 0,98).

2.2.2. Одномерная регрессия полевых образцов РЗЭ.

По сравнению с синтетическими образцами ультрафиолетовое излучение полевых образцов пород, содержащих РЗЭ, дало худшие результаты. Это связано с двумя причинами: во-первых, матрица, которая значительно сложнее матрицы синтетических образцов, состоящей только из одной породы (серпентинита). Во-вторых, существуют большие различия в матрице между различными местоположениями образцов. Результаты UVR были снова оценены на основе коэффициентов определения. Они варьируются от 0,43 до 0,85 для полевых образцов горных пород (табл. 3). Примером является наилучшая линия La при 408,67 нм ($R^2 = 0,82$, рис. 6а). За исключением Nd, лучшие линии излучения других исследованных РЗЭ дают коэффициенты определения около 0,80 (табл. 3).

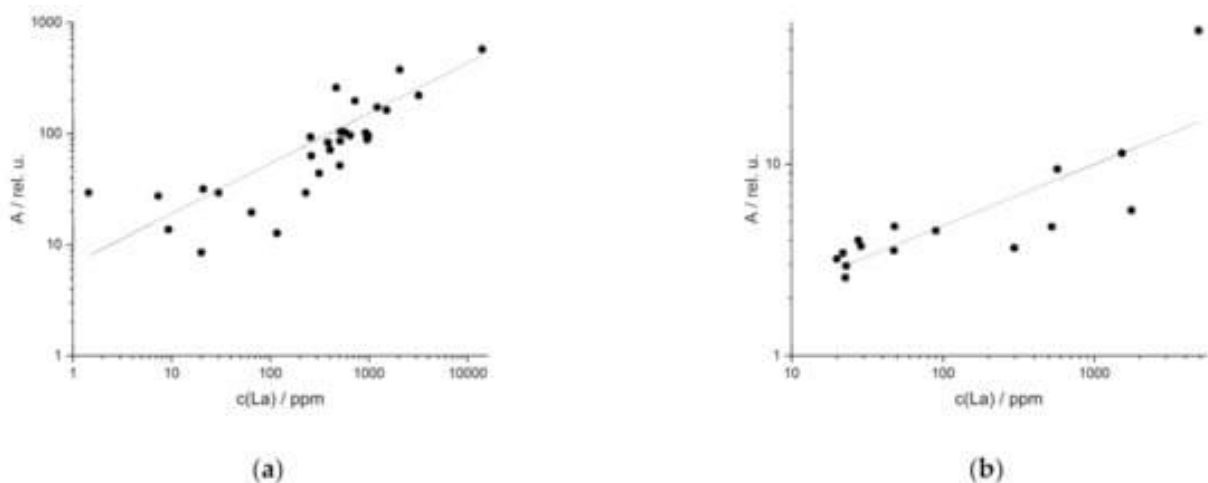


Рис. 6. Одномерная регрессия полевых образцов
(а) в породах из Лос-Анджелеса (R^2 (408,67 нм) = 0,82) и (б) в почвах из Лос-Анджелеса (R^2 (404,29 нм) = 0,52).

Результаты одномерной регрессии полевых образцов РЗЭ (Ce, La, Nd, Y) в горных породах и почвах: длина волны, LOD и R² лучших и других проанализированных линий РЗЭ.

Species	λ /nm	LOD/ppm	R ²	Species	λ /nm	LOD/ppm	R ²
in rocks				best results			
Ce II	413.76	218	0.79	Ce II	380.15	290	0.75
La II	408.67	199	0.82	Ce II	446.02	210	0.7
Nd II	325.91	1090	0.56	La II	404.29	180	0.79
Y II	437.49	117	0.85	La II	433.37	220	0.77
				other lines			
				Nd II	386.34	250	0.41
				Nd II	325.91	1230	0.47
				Y I	412.82	160	0.82
				Y II	321.68	140	0.80
in soils				best results			
Ce I	594.08	359	0.51	Ce I	560.12	500	0.41
La II	404.29	294	0.52	Ce I	571.9	470	0.41
Nd II	325.91	592	0.43	La II	433.37	540	0.48
Y I	297.45	296	0.43	La I	624.99	860	0.44
				other lines			
				Nd II	380.53	410	0.16
				Nd II	386.34	800	0.34
				Y II	321.68	350	0.33
				Y I	410.24	600	0.20

Более сильные матричные эффекты могут наблюдаться при ультрафиолетовом излучении полевых образцов почвы. Эти образцы имеют еще большую дисперсию в составе, что влияет на спектры ЛІВ. УФ-излучение наилучших линий дает низкие коэффициенты определения от 0,16 до 0,52 (табл. 3). Это показано на рисунке 6b для линий регрессии La (404,29 нм).

Средний LOD для исследованных REE в полевых образцах (почвах и горных породах) составляет 300 ppm (за исключением Nd в горных породах) со стандартным отклонением 140 ppm. Таким образом, значения LOD немного выше, чем LOD синтетических образцов. Лучшие результаты УФ-анализа были получены для тех образцов, которые имеют такой же и менее сложный матричный состав, т.е. для синтетических образцов горных пород или почвы. В образцах естественных полей с сильными вариациями матрицы многомерные методы потенциально способны компенсировать вариации спектральных помех, вызванных различиями в составе матрицы, и могут быть альтернативой ультрафиолетовому излучению.

2.3. Характеристика матричных эффектов с помощью PCA.

Один из способов исследовать эти влияния матриц - охарактеризовать различия в химическом составе почвы и породы. Это возможно с помощью неконтролируемых методов, таких как анализ основных компонентов (PCA). Для этой цели с помощью PCA исследуются ЛІВ-спектры почв и пород, собранных вблизи трех месторождений РЗЭ. Первые два основных компонента показаны на графике оценки (рис. 7). Для эталонных пород 82,8% отклонения может быть объяснено первыми двумя компонентами (рис. 7a). В случае эталонных почв 96,7% дисперсии объясняется двумя компонентами (рис. 7b). На графике оценки образцов горных пород (рис. 7a) образцы трех месторождений образуют четко разделенные кластеры, которые отображаются разными цветами. Образцы отдельных кластеров месторождений

также демонстрируют значительное рассеяние, особенно в случае образцов Norra Kärr. Это позволяет определить происхождение образцов, а также указывает на сильные различия в химическом составе матриц внутри месторождений и между ними, что обусловлено типами пород, присутствующих в отдельных месторождениях. Все три месторождения состоят из кремнистых или углеродистых пород. Однако включенные минералы влияют на состав и, таким образом, позволяют дифференцировать отложения по PCA. Магматическая порода шведского месторождения Норра-Карр (красная) представляет собой нефелиносодержащий сиенит агпайтового состава. Эти образцы особенно богаты натрием и калием. Напротив, месторождение Олсерум (зеленое) имеет в основном кордиеритсодержащий гнейс. В результате кремнистая порода содержит магний и алюминий. Породы комплекса Fen (синий) являются карбонатитами. Из-за химических и физических процессов выветривания и сопутствующей деградации точки данных частично разбросаны по большим площадям даже внутри кластеров. Кроме того, широко разнесенные места отбора проб (> 50 м) способствуют разделению точек данных. Точки из месторождения Норра-Карр показывают наибольший разброс. Здесь места отбора проб находятся на расстоянии до 200 м друг от друга. Отобранные жилы в Олсеруме находятся на расстоянии около 150 м друг от друга.

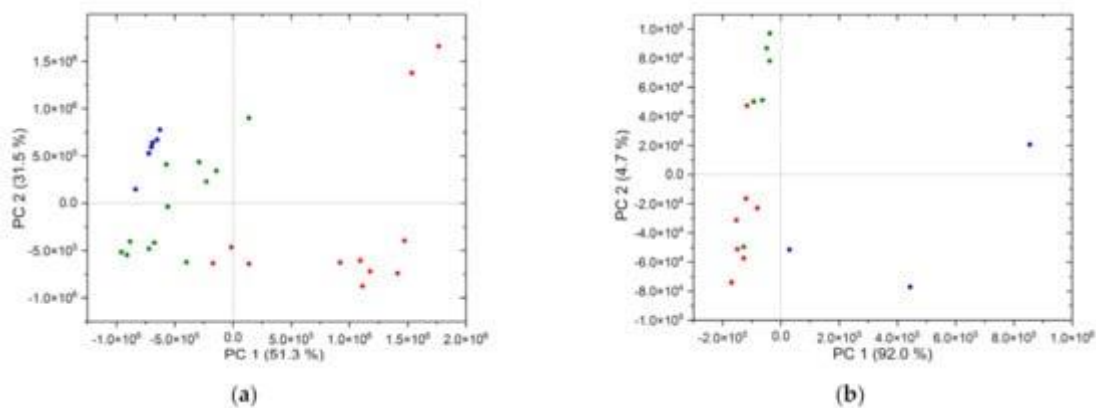


Рис. 7. (а) PCA эталонных пород (VIS, raw), (b) PCA эталонных почв (VIS, raw): синий—комплекс Фен, зеленый—Ольсерум, красный—Норра Карр.

Для почв интерпретация PCA (рис. 7b) является более сложной, поскольку почвы состоят не только из физически выветрившихся горных пород, но и из органического вещества из биосферы и атмосферной пыли. Тем не менее, как и при анализе основных компонентов эталонных пород, может наблюдаться группирование точек данных в соответствии с месторождениями и их отделение друг от друга. Вероятно, это связано с присутствием горных пород. Хотя места отбора проб в месторождениях находятся далеко друг от друга, точки данных в PCA не так разделены, как в случае эталонных пород. Это может быть связано с поступлением органического вещества и атмосферной пыли во время формирования. Таким образом, образцы, возможно, более однородны. Напротив, сильное разделение точек данных

из комплекса Fe_n (синий) особенно бросается в глаза. Вероятно, это связано с разной степенью выветривания почв.

Для сравнения, оба PCA показывают схожие результаты: точки данных сгруппированы по месторождениям и отделены друг от друга. Все кластеры показывают внутреннее разделение точек данных. Объясненная дисперсия обоих анализов PCA уже составляет >82% для двух основных компонентов. Таким образом, можно отнести представленные образцы к одному месторождению. Удивительно, но объясненная дисперсия эталонных почв больше, чем у горных пород. Причиной этого может быть природа образцов. Образцы почвы находятся в порошкообразной форме и, таким образом, демонстрируют большую макроскопическую однородность, чем исследованные породы. В результате свойства распределяются более равномерно, так что компоненты PCA улавливают больше свойств. Таким образом, эталонные почвы могут быть объяснены меньшим количеством основных компонентов.

Однако различия в химическом составе образцов также очевидны в обоих анализах. Эта неоднородность полевых образцов поражает в PCA полевых и синтетических образцов (рис. 8a,b). В дополнение к спектрам LIB эталонных пород в анализ были включены спектры синтетических образцов (Ce). Из анализа основных компонентов (рис. 8a) видно, что синтетические образцы более однородны. Эти точки данных (оранжевые) сосредоточены в небольшой области графика оценки. Тем не менее, они расположены не только в одной точке на графике оценки, как показывает увеличение на рисунке 8b. Для сравнения, точки данных полевых образцов распределены по большой площади на графике. Это подтверждает наблюдение о том, что разделение образцов из разных мест вызвано различиями в химическом составе матрицы, а не вариациями концентрации REEs.

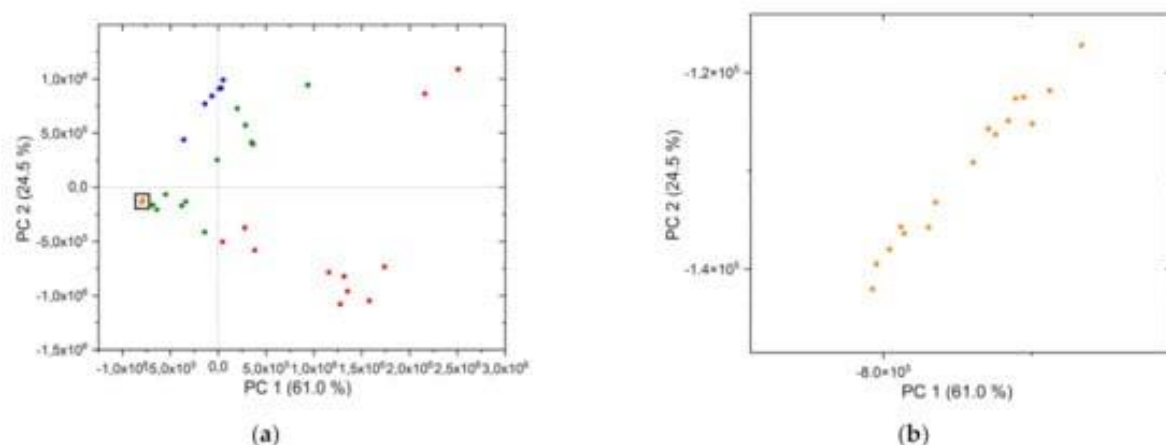


Рис. 8. (a) PCA эталонной породы и синтетических образцов (Ce),

(b) увеличение площади с синтетическими образцами (Ce): синий Фен-комплекс, зеленая сыворотка, красная Норра Керр, оранжевые синтетические образцы (Ce).

После выполнения PCA становится ясно, что УФ-излучение хорошо подходит для синтетических образцов, поскольку они имеют более однородный состав. С другой стороны,

для полевых образцов одномерная регрессия непригодна из-за неоднородной матрицы. Поэтому для гетерогенных образцов рассматривается использование многомерных регрессионных моделей.

2.4. Интервальная регрессия методом частичных наименьших квадратов (iPLS).

В качестве многомерного метода использовалась интервальная регрессия методом частичных наименьших квадратов (iPLS), основанная на выборе переменных. В этом методе спектры разделяются на интервалы равной спектральной ширины. Количество интервалов и количество компонентов были определены на основе наименьшего RMSE индивидуально для каждого образца и приведены в таблицах 4 и 5.

Табл. 4.

Результаты регрессии iPLS синтетических образцов в горных породах и почвах.

Species	# Intervals	Interval Width/nm	iPLS: R ²	PLS: R ²
	# Components	Element Line/nm	RMSECV	RMSECV
synthetical samples in rocks				
Ce II	3000 intervals	0.02	0.98	0.88
VIS	10 components	507.50	1500 ppm	3719 ppm
La II	20 intervals	20.35	0.99	0.99
VIS	4 components	398.8, 399.57, 403.2, 404.29, 407.7, 408.67	490 ppm	391 ppm
Nd II	1 interval	490.56	0.98	0.96
VIS	3 components	380.53	1650 ppm	2250 ppm
Y II	3000 intervals	0.05	0.99	0.73
UV	10 components	324.20	590 ppm	5130 ppm
synthetical Samples in Soils				
Ce II	2000 intervals	0.20	0.99	0.93
VIS	12 components	407.90, 408.00	280ppm	840 ppm
La II	2000 intervals	0.19	0.96	0.24
VIS	6 components	394.90	0.42%	3205 ppm
Nd II	3000 intervals	0.16	0.95	0.73
VIS	7 components	532.00	0.45%	1903 ppm
Y II / I	800 intervals	0.46	0.98	0.95
VIS	4 components	374.80, 374.90	480 ppm	827 ppm

Табл. 5.

Результаты регрессии iPLS полевых образцов в породах и почвах.

Species	# Intervals	Interval Width/nm	iPLS: R ²
	# Components	Element Line/nm	RMSECV
field samples in rocks			
Ce II	2000 intervals	0.288	0.92
VIS	18 components	639.30	1680 ppm
La I	5000 intervals	0.078	0.92
VIS	3 components	495.00	760 ppm
Nd I	400 intervals	1.30	0.89
VIS	15 components	521.30	1000 ppm
Y I	1000 intervals	0.52	0.91
VIS	4 components	552.76	870 ppm
field samples in soils			
Ce II	400 intervals	1.24	0.83
VIS	12 components	502.30	1000 ppm
La II	1800 intervals	0.269	0.93
VIS	11 components	497.00	350 ppm
Nd II	1000 intervals	0.164	0.83
VIS	12 components	307.50	420 ppm
Y II	2100 intervals	0.17	0.84
VIS	11 components	371.00	200 ppm

Метод был впервые протестирован на более однородных синтетических образцах. Как показано результатами в таблице 4, регрессия iPLS дает такие же хорошие, а в некоторых случаях даже лучшие результаты, чем UVR для этих образцов. Таким образом, для синтетических образцов церия в породе может быть получен лучший коэффициент определения 0,98 по сравнению с UVR ($R^2 = 0,91$, см. табл. 2). Улучшение регрессии также

может быть достигнуто для иттрия (R^2 (*i*PLS) = 0,99, R^2 (UVR) = 0,97). Для лантана и неодима (рис. 9а) коэффициенты определения *i*регрессии PLS и UVR находятся в одном и том же хорошем диапазоне.

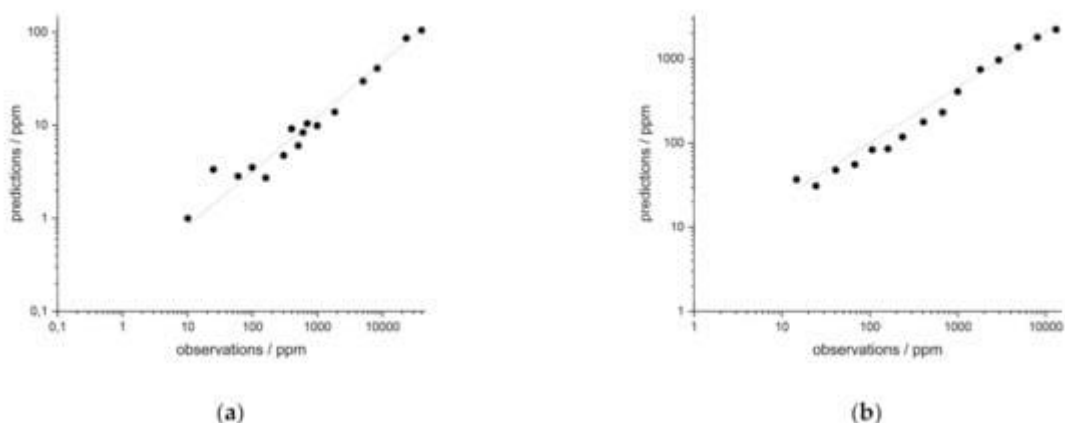


Рис. 9. PLS-регрессия синтетических образцов (а) в горных породах Nd и (b) в почвах Y.

Аналогичные результаты были получены для образцов синтетической почвы (см. одномерные данные в таблице 2 и данные регрессии *i*PLS в таблице 4). На рисунке 9b показаны результаты *i*PLS определения иттрия в почвах. Для исследованных РЗЭ церия, лантана, неодима и иттрия были достигнуты коэффициенты определения в пределах $R^2 = 0,95–0,99$. Они аналогичны R^2 для UVR ($R^2 = 0,96–0,99$). Тот факт, что многомерный метод работает так же хорошо или даже лучше для синтетических образцов, предполагает, что их применение к гетерогенным полевым образцам может быть полезным.

Применение регрессии *i*PLS к гетерогенным полевым образцам дает значительно лучшие результаты регрессии, чем UVR во всех исследованных случаях. Для образцов в породе можно получить $R^2 > 0,91$ (табл. 5). Для лантана (рис. 10а), в отличие от UVR ($R^2 = 0,82$), коэффициент определения $R^2 = 0,92$ может быть достигнут с помощью *i*PLS регрессии. Для неодима методом многомерной регрессии найдено значение R^2 , равное 0,98 (рис. 10b), что также значительно лучше, чем для UVR (R^2 (UVR) = 0,56). Несколько менее выраженными, но не менее хорошими являются улучшения в регрессиях церия и иттрия в горных породах.

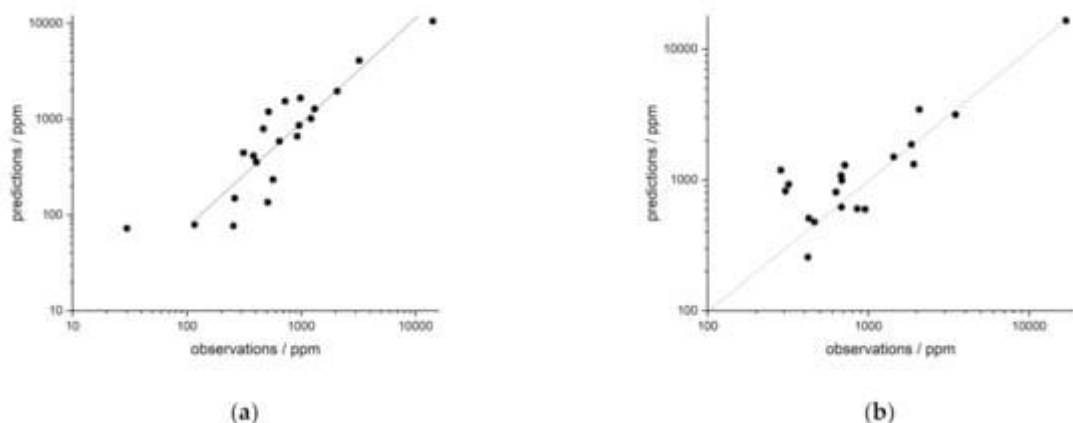


Рис. 10. PLS-регрессия полевых образцов в породах (а) La и (b) Nd.

Улучшение регрессии наиболее очевидно для полевых образцов почв. Наилучший коэффициент определения, достигнутый для UVR, составил $R^2 = 0,52$. Все коэффициенты определения, полученные для регрессии *i*PLS, лучше, чем $R^2 > 0,83$ (табл. 5). Для лантана значение одномерной регрессии $R^2 = 0,52$ может быть увеличено до $R^2 = 0,93$ в многомерной регрессии. Улучшение столь же сильно в случае неодима. Сопоставимы с этим изменения регрессии для иттрия и церия.

В регрессии *i*PLS учитываются только интервалы, содержащие соответствующую информацию, такую как линии элементов (табл. 4 и 5). С этой целью в большинстве случаев приходилось использовать очень малую ширину интервала. Таким образом, последующую регрессию PLS также можно считать автоматическим UVR. Тем не менее, регрессия *i*PLS имеет более высокие коэффициенты определения, чем UVR. В дополнение к *i*PLS также была исследована регрессия PLS всех спектров. Однако этот метод не смог обеспечить прогноз лучше, чем предположение. Это демонстрирует преимущество выбора переменных в *i*таблицах. Из-за иногда чрезвычайно узких интервалов в регрессию включаются только части соответствующих линий элементов. Отрицательные эффекты, такие как самопоглощение и частичное загрязнение края линий, исключены, что приводит к улучшению регрессий с более высокими коэффициентами определения.

В частности, качество регрессии полевых образцов почвы показывает силу выбранного здесь многомерного метода *i*PLS регрессии. В то время как при одномерной регрессии в среднем достигается коэффициент определения $R^2 = 0,47$, регрессию можно улучшить до среднего значения $R^2 = 0,88$. В дополнение к выбору подходящих спектральных областей, содержащих релевантную информацию, выбор переменных также позволяет исключить интервалы, содержащие шум или другие нерелевантные данные. Это может учитывать влияние матричных эффектов исследуемых пород и почв.

3. Выводы

LIBS является многообещающим методом обнаружения редкоземельных элементов в горных породах и почвах, поскольку этот метод может быть использован для обнаружения REE в различных матрицах без пробоподготовки или с минимальной пробоподготовкой. Однако спектральное влияние, обусловленное матрицами, проблематично. Чтобы учесть это влияние и повысить эффективность анализа, требуются многомерные методы, особенно для гетерогенных образцов. В настоящей работе для анализа данных LIBS были использованы два подхода. Первый подход - это UVR, основанный на площади пика соответствующих сигналов LIBS. Здесь матричные эффекты гетерогенных полевых образцов были определены как проблематичные и дополнительно исследованы с

использованием PCA. Влияние этих эффектов рассматривается во втором подходе, многомерном методе. Использовалась регрессия *iPLS*, в которой в регрессию были включены только соответствующие области спектра. Это улучшило точность прогнозирования регрессии. Исследования показывают, что обнаружение и оценка REE в горных породах и почвах возможны с использованием LIBS в сочетании с многомерной регрессией *iPLS*. Таким образом, использование мобильных LIB-спектрометров может потенциально способствовать разведке новых месторождений РЗЭ.

Для повышения прогностической способности метода дальнейшие исследования следует расширить за счет образцов из других месторождений. Особый интерес здесь представляют образцы, содержащие РЗЭ, которые имеют различные сопутствующие матрицы. Для будущих исследований можно использовать большие интервалы и комбинации отдельных интервалов с меньшим количеством компонентов. Для возможного применения в полевых условиях следует дополнительно изучить использование мобильного спектрометра. Если эти исследования окажутся успешными, многообещающей возможностью может стать перенос разработанных здесь методов в полевые условия.

4. МАГМА-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ФЛЮИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ при формировании Sn и W в гранитах *пояс Кибара (Демократическая Республика Конго)*

Введение.

Граниты и связанные с ними перигранитовые флюидные процессы создают критические месторождения металлов, таких как Sn, Nb, Ta, W и REE. Лейкограниты пояса Кибара (КИБ) возникли в результате процессов частичного плавления земной коры, называемых “анатексис” во время Кибаранского коллизионного события. Проявления минерализации Sn-W обычно связаны с дифференцированными лейкогранитами. Зарождающиеся постмагматические процессы, такие как выделение флюида, взаимодействие флюида с породой, включая изменения, метасоматические реакции и смешение флюида с жидкостью (магматико-метеоритное), вносят значительный вклад в критическую подвижность металлов и обогащение. Эти син и постгранитные флюидные процессы определяют химический состав гранита (ассоциированных с ним пегматитов) и вмещающих пород. Свидетельства этих магматико-гидротермальных флюидных процессов можно найти во вторичных минеральных фазах через изменения и флюидные включения.

Касситерит и вольфрамит содержат значительные количества микроэлементов, в том числе In, Ga и REE. Методы катодолюминесценции SEM (CL) позволяют получить микротекстурную информацию о таких минералах, как касситерит и их геохимии. Описаны микротекстурные особенности в касситеритах, включая трещины, двойникование локтей и колебательную зональность, с помощью SEM-CL. Это показывает наличие чередующихся более темных и ярких зон CL. Эти текстуры касситерита могут быть связаны с включением в касситерит таких микроэлементов, как Ti, Fe, Nb, Ta и W.

Исследование флюидных включений предоставляет данные о составе минерализующих флюидов при давлении и температуре с использованием микротермометрии, рамановской спектроскопии для определения содержания газовых частиц и их количества и микроанализов LA-ICP-MS. Процессы осаждения Sn в связанных с гранитом месторождениях Sn-W были смоделированы, что показывает, что многоступенчатое и прогрессивное взаимодействие флюида и породы обеспечивает эффективный контроль над массивными рудными телами касситерита. Исследование включения флюидов на месторождении Sn Янки Лоде показало, что выпадение касситерита было связано с флюидами различной солености (+ микроэлементы) и температуры. Эти данные свидетельствуют о том, что смешение флюидов магматического и метеоритного происхождения является одним из основных факторов, контролирующих массовое выпадение высококачественного Sn.

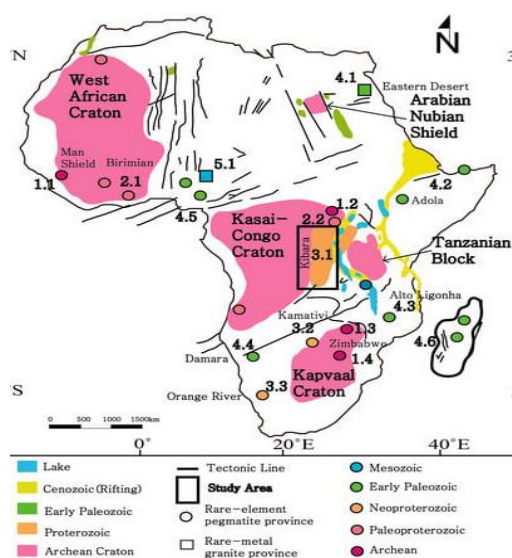


Рис. 1. Схема африканских провинций редкометалльного гранита и пегматита.

Цвета связаны с возрастом провинций. Черный прямоугольник обозначает область исследования. Металлогенетические провинции: 1.1 Манский щит, 1.2 Кратон Конго, 1.3 кратон Зимбабве, 1.4 кратон Каапваал; 2.1 Провинция Бириман, 2.2 Кибалина на северо-востоке ДРК; 3.1 Пояс Кибара, 3.2 Пояс Камативских сланцев, 3.3 Пояс Ориндж-Ривер; 4.1 Восточная пустыня, 4.2 Пояс Адола, 4.3 провинция Альто-Лигонья, 4.4 Пояс Дамара, 4.5 Более древние граниты (Нигерия), 4.6 Мадагаскара; и 5.1 более молодых гранитов (Нигерия).

Пояс Кибара (КИБ) в Демократической Республике Конго (ДРК) (рис. 1, 2) содержит массивные Sn-W и другие минералоносные граниты, а также связанные с ними перигранитные кварцевые жилы. Общее совокупное производство за период до 2010 года для КИБ в ДРК составляет 800 000 тонн касситерита, 30 000 тонн колумботанталита, 30 000 тонн вольфрамита, 600 тонн золота и побочных продуктов - висмута, молибдена, берилла и амблигонита. В КИБ в немногих исследованиях были изучены петрогеохимические и тектоно-структурные характеристики гранитных интрузий и кварцевых жил, в которых сочетались внутренние микротекстуры касситерита, химический состав руды и флюидные включения, чтобы ограничить вклад изменений и магматико-гидротермальных флюидных процессов во время рудоотложения Sn-W. В этом исследовании предоставлены объединенные результаты химического состава флюидов и руд, чтобы продемонстрировать роль изменений и флюидных процессов в осаждении высококачественного касситерита и вольфрамита в КИБ в Демократической Республике Конго.

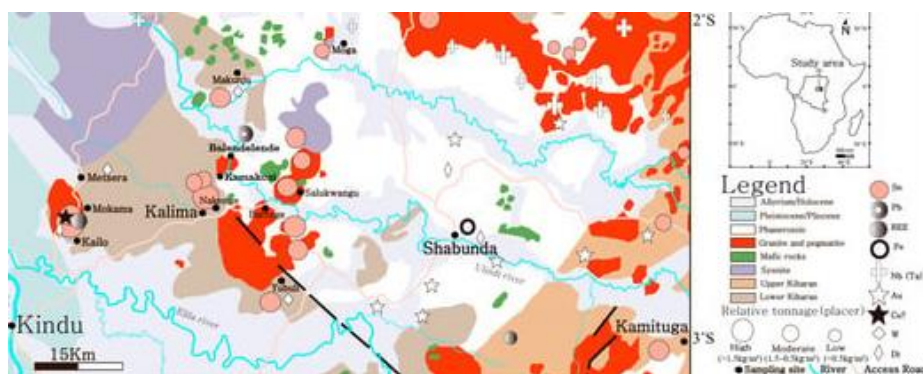


Рис. 2. Геологическая схема СЗ пояса Кибара (КИБ) в провинции Маниема в Демократической Республике Конго

На карте указаны минеральные ресурсы и перспективы этой части КИБ, а места отбора проб и населенные пункты отмечены черными точками.

1. Геологические характеристики КИБ.

Африка включает многочисленные архейские кратонические ядра, которые сшиты вместе несколькими орогенными событиями, приводящими к распаду и аккреции. Геохронология, основанная на Rb-Sr и цирконе U-Pb, указывает на то, что регион Африки к югу от Сахары состоит из архейских щитов (кратон Конго-Касаи и танзанийский блок, рисунок 1), сшитых эпизодическими орогенами от архея до фанерозоя (рис. 1, 2 и 3). Мезопротерозойский Кибаранский ороген в ДРК сформировал пояс, названный “Пояс Кибара (KIB)”, который является частью обширной Центрально-Африканской металлогенической провинции (рис. 1) и содержит многочисленные высокосортные месторождения Sn и W-Nb-Ta, связанные с гранитами (рис. 2 и 3).

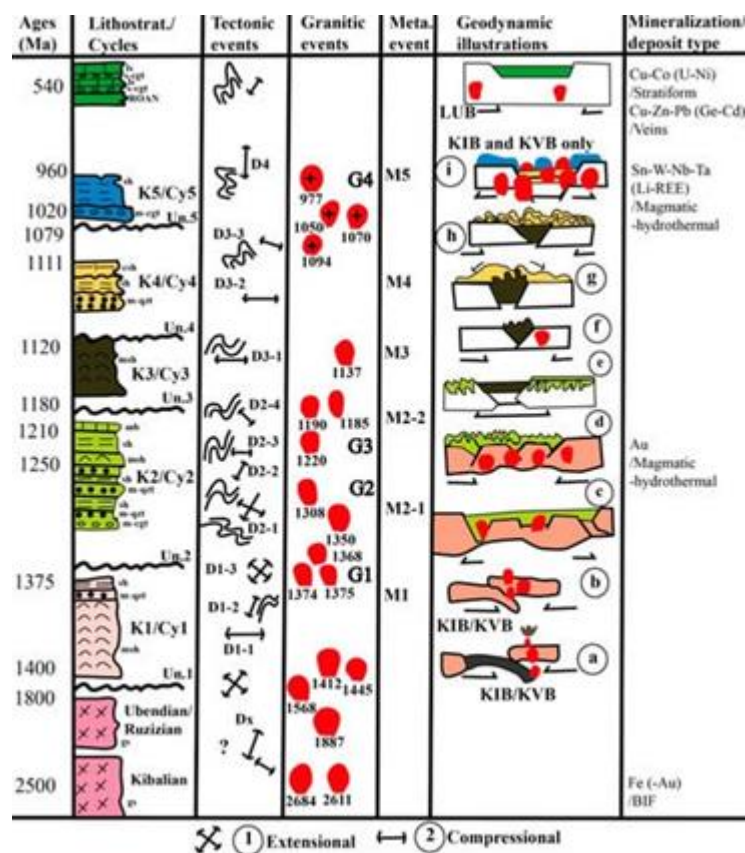


Рис. 3. Синтез тектоно-магматических и стратиграфических подразделений КИБ.

Гранитные интрузии в мезопротерозое подразделяются на четыре кластерные группы, обозначенные как G1 - G4. Только новейшие G4 и связанные с ними кварцевые жилы и пегматиты минерализованы минералами группы оксида Sn и группы колумбита.

(K/Cy=тектоностратиграфические циклы; Un=основные несогласия; D=тектонические события; G=основные гранитные события; M=основные метаморфические события; a-i=основные этапы геодинамической эволюции; 1—тектонический режим растяжения; 2—тектонический режим сжатия; Литология: ls = известняк, s-cgt = осадочный- конгломерат, sh = сланец, m-cgt = метаморфический конгломерат, csh = известковый сланец, m-qtz = метакварцит, msh = слюдянистый, mb = мраморный, gs = гнейсовый; Орогены: KIB = пояс Кибара, KIV = пояс Киву, LUB = пояс Луфилян.

Фундамент КИБ состоит из метаосаждений, в том числе метапелитовых сланцев и гранитного гнейса (рис. 3). Ориентации слоистости метаморфических пород в поясе следующие: NE-SW в южной части (в провинциях Луалаба, Верхний Ломами, западная Верхняя Катанга и Танганьика), NW-SE в северной части (провинция Маниема) и N-S в центральной части (в провинциях Маниема и Южное Киву). Центральная и северная части пояса покрыты кремнекlastической осадочной толщей бассейна Конго толщиной около 10

км. Метаосадочный фундамент Кибары был нарушен серией безрудных и минерализованных гранитов и подчиненных мафитовых тел во время мезопротерозойского горообразования (рис. 3). Группы Sn-W минерализованных и бесплодных кварцевых жил, связанных с гранитными интрузиями, пересекают как граниты, так и метаосадочный фундамент. Мезопротерозойский КИБ перекрывает палеопротерозойский пояс “Убенде” в северной части, вмещающий Fe-Au минерализацию, а в южной части он частично перекрыт неопротерозойским поясом “Луфиланский пояс или замбийский пояс”, известным месторождениями Cu-Co.

В КИБ содержатся ценные минералы, в том числе касситерит, вольфрамит и колумбит, которые являются основными первичными рудами, связанными с гранитами и перигранитными кварцевыми жилами. КИБ имеет вторичную россыпную минерализацию в аллювиальных и элювиальных отложениях в близлежащих реках и долинах, примерно в 1-2 км от первичных минерализованных гранитов и связанных с ними кварцевых жил (рис. 2). Толщина элювиального слоя гравия, вмещающего россыпи, составляет менее 2 м, а содержание касситерита (Sn) в гравии колеблется от 0,2 до 5 кг/м³ (среднее содержание порожняка: 0,5–1,5 кг/м³). Sn-W руды в поясе содержат значительные количества побочных продуктов, таких как Nb, Ta, As, Hg, Pb, U, REE и Au.

Магматизм, классификация пород и руд, хронология.

Гранитные интрузии в КИБЕ представляют собой перламинозный гранит S-типа и лейкократовый гранит, образованный плавлением богатых Al метаосадочных пород во время орогении Кибарана. Граниты КИБ классифицируются на три основные фазы в зависимости от возраста, текстуры и содержания рудных минералов (рис. 3). Первая фаза состоит из предтектонических “бесплодных” от крупнозернистых до мелкозернистых гранитных интрузий (G1-G3, рис. 3) возрастом 1100-1500 млн лет, которые содержат кварц, плагиоклаз, K-полевошпат и биотит. Вторая фаза включает кибаранские посторогенные “Sn-(W) минерализованные” граниты (G4, рис. 3) 950-1094 млн лет. Эти граниты равнозернистые и содержат кварц, биотит-мусковит, альбит и вспомогательные минералы, такие как роговая обманка, апатит, и рудные минералы, такие как касситерит, пирит, халькопирит и сфалерит. Третья фаза включает гранитные пегматиты (G4 или G5, в зависимости от их местоположения в ДРК и Руанде соответственно) возрастом 755-950 млн лет, которые демонстрируют обогащение Nb-Ta-Sn.

В поясе Кибара различают два типа пегматитов: богатые Li-Cs-Ta (LCT-тип) и Nb-Y-F-богатые (NYF-тип). Эти пегматиты LCT (в изобилии) и NYF (редко встречающиеся) состоят из кварца и слюд (биотит, мусковит, лепидолит и сподумен) и вспомогательных минералов, таких как плагиоклазы (альбит-олигоклаз), берилл, турмалин, касситерит, апатит, колумботанталит, фосфаты и редкие сульфатные минералы.

Петрография минерализованных гранитов Sn (-W).

Граниты, содержащие Sn “второй фазы G4”, в КИВ состоят из (1) равнозернистых гранитных куполовидных (минерализованных), (2) грейзенизированных гранитов (минерализованных), (3) пегматитов (минерализованных) и (4) линзовидно инжектированных и трубообразных гранитов апплита (менее минерализованных). В этом исследовании сосредоточились на минерализованных гранитах (1-3) КИВ в провинции Маниема (участки Калима и Мокама, рис. 2). Контакт между гранитными интрузиями и метаосадочным фундаментом обычно наклонен (под углом, превышающим 60°). Контакт между минерализованными гранитами и пегматитами (район Кайло, рис. 2 и 4i) часто демонстрирует боковую градацию уменьшения размеров минералов в виде чешуек слюды и агрегированных зерен кварца от пегматита к гранитам. Равнозернистые гранитные интрузии часто встречаются в крупных телах батолита, приблизительно 4-7 км в длину и 1-2 км в ширину.

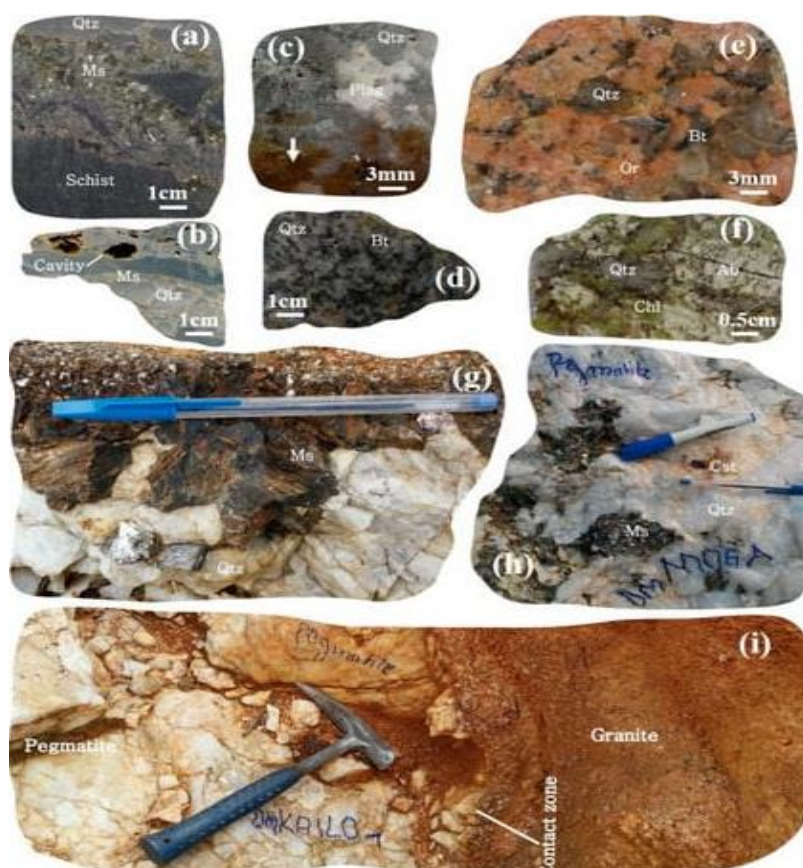


Рис. 4. Макрографии образцов горных пород из КИВ в провинции Маниема:

(a,b) Минерализованные кварцевые жилы, пересекающие сланец и показывающие изменения мусковита и полости с участка Юбули; (c,d) Минерализованные граниты с участка Мокама, показывающие такие изменения, как красная крошка (белая стрелка) и миаролитовые полости; (e) свежий голый гранит обилием k-полевого шпата (розоватый ортоклаз); (f) измененный гранит с участка Баленделенде с признаками хлоритизации (зеленая масса хлорита) и альбитизации (пластинки плагиоклазов, включая альбит); (g,h) минерализованные пегматиты с участка Мога с признаками гигантских кристаллов кварца и крупных хлопьев мусковита; (i) Зона контакта между пегматитом и гранитом с участка Кайло, демонстрирующая размеры изменений минералов.

Минерализованные граниты состоят из K-полевого шпата, кварца, альбита, биотита, мусковита и роговой обманки (рис. 4c, d и 5a, b).



Рис. 5. Макрофотографии образцов кварцевых жил:

(a,b) Безрудные кварцевые жилы, пересекающие граниты с участка Мокама; (в) Минерализованные кварцевые жилы с участка Калима (и Накенге); (d) Минерализованные кварцевые жилы с участка Батамба, показывающие перекристаллизованный кварц, который заполняет полости; (e,f) Минерализованные кварцевые жилы с участка Батамба, демонстрирующие сланцеватость, микроразломы и микроразломы; (g) Минерализованная кварцевая жила с участка Юбули, демонстрирующая изменение мусковита; (h) минерализованная кварцевая жила с участка Батамба, демонстрирующая микроразлом со смецением.

Некоторые зерна кварца содержат включения мусковита, серицита и альбита (рис. 4с). В гранитах наблюдаются округлые текстуры и миаролитовые полости. Полости, образующие миаролитовые текстуры, достигают 1-5 см в диаметре (рис. 5с). Грейзенизация характеризуется обильным содержанием мусковита (рис. 4с, d). Эти грейзенизированные породы (Салуквангу и Накенге на участках Калима; рис. 2) состоят из кварцевых агрегатов и чешуек мусковита, связанных с небольшим количеством черного турмалина (schorl), альбита, лепидолита, топаза и флюорита. В этих породах центральные части в основном состоят из кварца, окаймленного темной каймой из черного турмалина, а внешние части содержат в основном кварц и мусковит с незначительными вкраплениями черного турмалина, топаза, флюорита и лепидолита. Касситерит встречается в грейзенизированных гранитах (в избытке в центральной, второстепенной во внешних частях) в куполе или в зоне контакта с метаосадочным фундаментом. Некоторые равнозернистые граниты, такие как на участке Мокама (МОКА-2-6 и МОКА-2-9; рис. 2), содержат сульфидные минералы, включая

халькопирит, борнит, сфалерит, пирит и супергенные минералы, такие как халькоцит, ковеллит и малахит.

Минерализованные пегматиты Sn (-W) встречаются в виде линзовидных или трубообразных тел диаметром менее 50 м. Эти пегматиты находятся в контакте с гранитом на участке Кайло (рис. 2 и 4i) или сквозными метаосадочными породами в районе Мога (рис. 2 и 4g, h).

Петрография кварцевых жил Sn-W.

В исследуемом районе встречаются два типа кварцевых жил: (1) минерализованные жилы Sn-W, которые пересекают метаосадочный фундамент и (2) безрудные жилы, которые пересекают в основном граниты и, реже, метаосадочные отложения.

Минерализованные кварцевые жилы Sn-W имеют возраст 820-905 млн лет (Ar-Ar по мусковиту). Жилы толщиной до 15 см (рис. 5f) состоят из раннего эугедрального кварца, за которым следуют более поздние руды. Парагенетическая последовательность среди руд такова: (1) касситерит, (2) касситерит-вольфрамит и (3) сульфиды, включая арсенопирит, пирит и молибденит (рис. 4a,b и 5d, g). На участках Юбули и Мокама (рис. 2) несколько минерализованных кварцевых жил (рис. 4b, c и 5d), которые пересекают метаосадочный фундамент, содержат сульфидные минералы, включая арсенопирит, халькопирит, сфалерит, пирит и редко борнит. Минерализованные кварцевые жилы Sn-W, как правило, прямые (рис. 4a, b и 5d, f-h), но часто изогнутые (рис. 5e), складчатые или с разломами (рис. 5e).

Бесплодные кварцевые жилы толщиной 1-5 см (рис. 5a, б), состоящие из пирита, флюорита и незначительных оксидов железа. Они прямые и содержат ранний пирит, за которым следует сростание эугедрального кварца и флюорита (рис. 5a, б). Эти бесплодные жилы тоньше, чем минерализованные жилы Sn-W.

Особенности изменений.

Граниты, содержащие Sn-W, и кварцевые жилы в КІВ демонстрируют различные особенности изменений. Ореолы этих изменений характеризуются присутствием таких минералов, как мусковит, серицит, альбит, хлорит и гематит (рис. 4a-i и 5a-d). Наблюдаются комплексы гипогенных изменений - пять групп: (1) кварц-хлорит-мусковит-серицит; (2) турмалин-альбит-топаз-мусковит-кварц; (3) турмалин-мусковит; (4) гематит-пирит; и (5) мусковит-кварц. Комплексы изменений 1-3 доминируют в гранитах с Sn-минерализацией, в то время как комплекс 4 доминирует в безрудных кварцевых жилах, прорезающих гранит, а комплекс 5 доминирует в Sn-W минерализованных кварцевых жилах, прорезающих метаосадочные породы. Среди минерализованных гранитов изменение (3) является доминирующим в самой высокой степени Sn.

неизвестными и стандартными эталонными материалами (SRM; NIST-612 и BCR-2) с частотой повторения 5 Гц и энергией лазера около 4-6 Дж/см². Диаметр пучка абляции составлял 50 мкм как для касситерита, так и для вольфрамита. Было проведено сравнение химического состава касситерита и вольфрамита (табл. 4).

Табл. 4.

Краткое изложение петрографии и геохимии руд.

Kibara Belt Cassiterite and Wolframite Summarized Textures, Trace Element Distributions, and Other Properties			
Properties	Cassiterite		Wolframite
	Cassiterite type I	Cassiterite type II	
Colors under naked eyes and microscope	Yellow transparent	Dark (to dark-reddish) translucent	Homogenous dark
Textures under microscope	Growth zone (oscillatory zoning), and replacement	Oscillatory zoning, replacement, and massive	Massive
Cathodoluminescence (CL)	Relatively higher luminescent (lighter)	Relatively low luminescent (darker)	Relatively low luminescent (darker)
Textures under CL	Growth zone (oscillatory zoning)	Oscillatory zoning and massive	Massive
Relative chronology	Earlier (old)	Later (young)	Very later (youngest)
Geochemistry (traces)	High Ti, V, Zr, Nb, Ta, Hf, and low Ce anomaly	High Fe, Al, Ga, In, As, U, Pb, Au, total REE, and high Ce anomaly	Al, Zn, Pb, Bi, Nb, high HREE
Mineral alteration evolution	Replaced by darker translucent cassiterite (type II)	Replaced by wolframite	No scheelite observed.

Для исследования флюидных включений были использованы 300 дважды отшлифованных фрагментов кварца (180), флюорита (30) и касситерита (90) из 100 дважды отшлифованных фрагментов. Петрографические описания типов флюидных включений (FI) и их комплексов (FIAS) были выполнены под микроскопом с проходящим светом и представлены в следующем разделе результатов. В Университете Инха была выполнена лазерная рамановская спектроскопия на пузырьковых участках более чем 40 включений водной жидкости. Мы использовали комбинационный конфокальный лазер (Horiba, LabRam HR Evolution model, Horiba Ltd., Киото, Япония) для обнаружения захваченных газов, таких как CO₂, CH₄, N₂ и H₂ во включениях. Лазер был оснащен чередующимися краевыми фильтрами с длиной волны 532 и 785 нм, регулируемым размером пятна 1-5 мкм и синхронизацией лазерного излучения 10-40 с.

Для микротермометрии жидких включений мы использовали стадию нагрева-охлаждения Linkam-FTIR 600 для определения таяния льда и общей гомогенизации (T_ч) FIs. Калибровку стадии проводили с использованием синтетических флюидных включений (водное включение, содержащее CO₂-CH₄, и включение чистой воды) для получения тройной точки (-57,1°C) смешанного водного включения CO₂-CH₄ и таяния льда (0,0°C) и критической температуры гомогенизации (374°C) включения чистой воды. Мы проанализировали около 3-6 включений, богатых водной жидкостью, в одном комплексе (FIA), и результат каждого комплекса был представлен в виде среднего ± стандартного отклонения (1σ) для его солености и температуры гомогенизации (табл. 5). Полученные микротермометрические результаты были обработаны

6 - (a,b) Макрофотографии касситерита и вольфрамита; (c,d) Соответствующие виды под SEM-CL для выбранных областей. Пунктирный белый прямоугольник показывает замену касситерита вольфрамитом (нерегулярная граница), а пунктирный желтый прямоугольник показывает зону роста чередующегося желтого прозрачного (более светлый CL) и темно-полупрозрачного (более темный CL) касситерита.
7 - (a,b) CL-изображения касситерита из кварцевых жил Юбули и Накенге грейзен, соответственно, показывающие зоны колебаний (или роста) и текстуры замещения; (c) Белым цветом показаны выделенные прямоугольники касситерита (из кварцевой жилы Юбули и Накенге грейзен) и вольфрамит (из кварцевой жилы Накенге), демонстрирующий колеблющуюся (зона роста) и замещающую текстуры.

Совместное залегание касситерита I и II типов, а также их пространственные соотношения демонстрируют различные текстурные особенности, такие как колебательная (или растущая) зональность (рис. 6a-d) и замещение (рис. 6b, d). Эти микротекстуры однозначно наблюдаются на снимках SEM-CL и в петрографические микроскопы (рис. 6, 7 и 8a). Тип I относительно сильно люминесцентен и отображает более светлые полосы по сравнению с типом II, который демонстрирует меньшую люминесценцию и более темные полосы (рис. 6c, d и 7a, b). Эти два касситерита встречаются в виде чередующихся или взаимозаменяемых полос “зон колебаний или роста” (рис. 6a–d и 7a–c). Тип II заменяет тип I в качестве “замещающей текстуры” (рис. 6d и 7c).

Текстура с колебательным зонированием (или зона роста) состоит из концентрических полос взаимозаменяемой относительной яркости и цветов или чередующихся полос CL типа I и типа II, похожих на изгибы, в виде складок (рис. 6a-d, 7a–c и 8a).

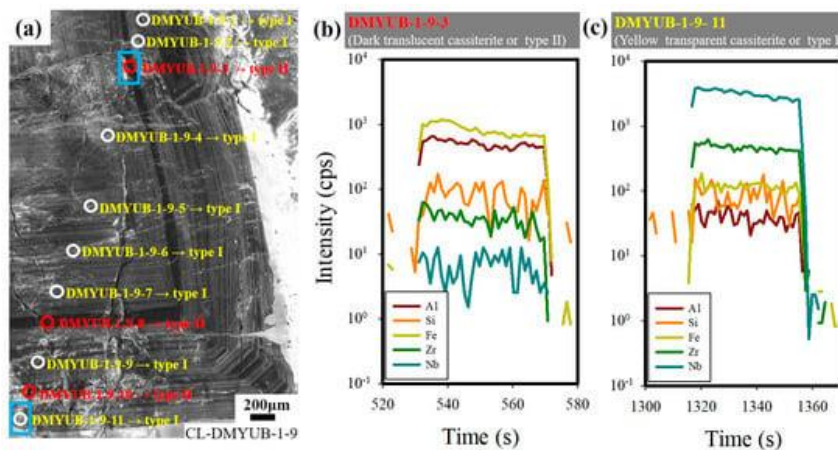


Рис. 8. Микрозональность касситерита и микроанализ LA-ICP-MS:

(a) Изображение SEM-CL, показывающее поперечный разрез в касситерите для последующего микроанализа LA-ICP-MS; (б) Переходный сигнал LA-ICP-MS, показывающий несколько обнаруженных микроэлементов (Fe-Al-Si-Zr-Nb) в темном полупрозрачном касситерите (более темный CL: тип II) из кварцевой жилы Юбули; (c) Сигнал в желтом прозрачном касситерите (более светлый CL: тип I) из кварцевой жилы Юбули.

Структура замещения демонстрирует зону замещения одного типа касситерита другим типом или вольфрамитом в W-содержащих рудах (рис. 6d и 7c). Тип I заменяется типом II через микротрещины, такие как трещины и локтевые зоны (рис. 7b, c). Касситериты в кварцевых жилах и гранитах демонстрируют относительно более толстые колеблющиеся полосы по сравнению с касситеритами в пегматитах, которые демонстрируют более тонкие полосы шириной менее 50 мкм.

В кварцевых жилах вольфрамит замещает касситерит (особенно II типа) (рис. 6d). Вольфрамит не имеет зональных особенностей; он однородно темный под CL (рис. 6b, d

и 7с). Пятна для микроанализов LA-ICP-MS на касситерите и вольфрамите были выбраны на основе микротекстурной информации (рис. 8а–с).

3.2. Составы касситерита и вольфрамита.

Два типа касситерита и вольфрамита (более темный и яркий SEM-CL) (рис. 6с, d, 7а, b и 8а) были проанализированы с помощью LA-ICP-MS (табл. 1, 2 и 3). Были получены поперечные сечения составов кристаллов касситерита и вольфрамита (участок Юбули; рис. 8а и табл. 1). Переходные сигналы LA-ICP-MS двух типов показывают контрастные концентрации микроэлементов (рис. 8b, c).

Микроэлементы в касситерите (рис. 8b,c и 9а–d; табл. 1, 2 и 3) указывают на то, что Fe, Al, In и Ga относительно обогащены типом II, тогда как Ti, Zr, Hf, Nb, Ta и V показывают относительное обогащение типом I (рис. 9а–d; табл. 1, 2 и 3).

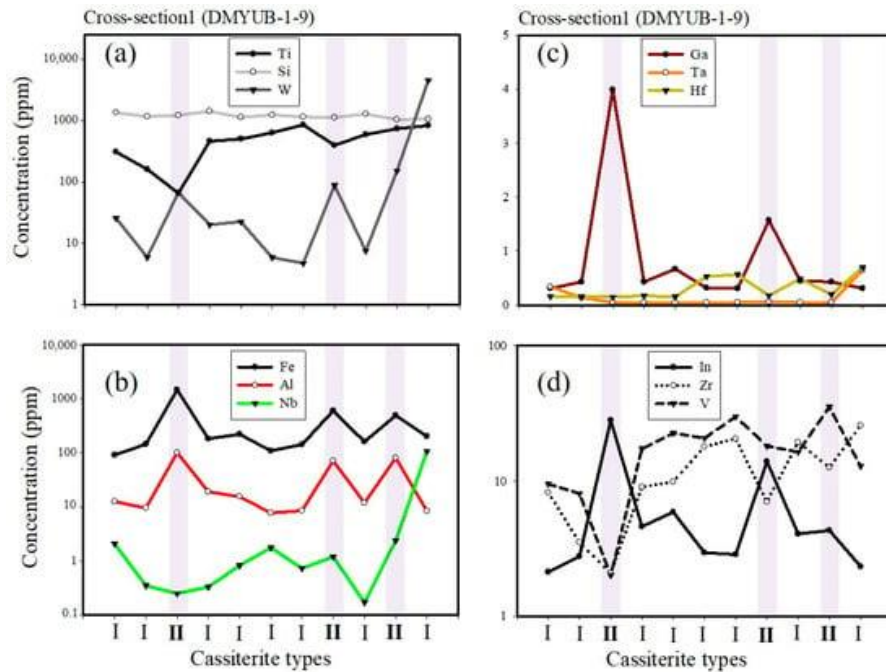


Рис. 9. Распределение микроэлементов в поперечном сечении касситеритов из кварцевых жил Юбули. (а) Концентрации Ti-Si-W в зависимости от CL; (б) концентрации Fe-Al-Nb; (с) концентрации Ga-Ta-Hf; и (д) концентрации In-Zr-V.

Si, Cu, Ni, Sc и Co не проявляют предпочтения в касситеритах (рис. 9а). Кристаллы касситерита демонстрировали как Се-положительные (рис. 10d; кварцевые жилы Юбули), так и отрицательные (рис. 10с; гранит Накенге и грейзен) значения аномалий (нормализованный по хондриту $Ce / Ce^* = 2Ce / (La + Pr)$). Вольфрамит также демонстрировал как положительные, так и отрицательные аномалии Се (рис. 10а, b).

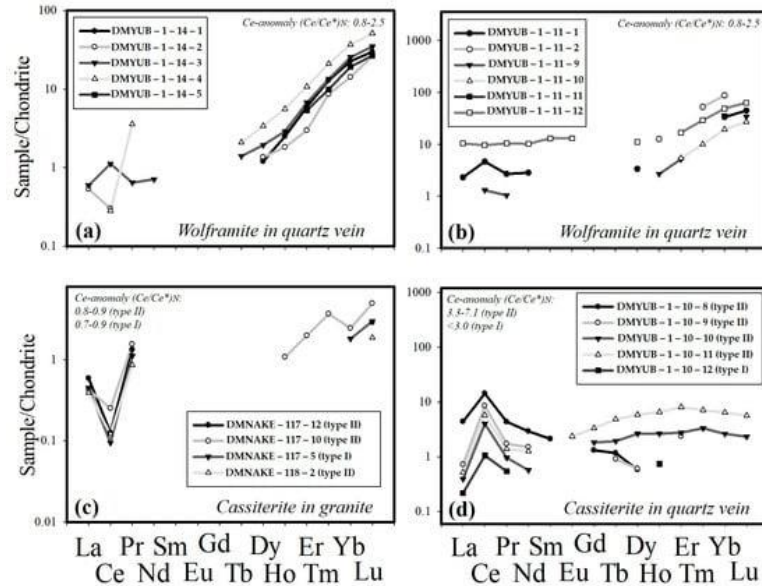


Рис. 10. Структура РЗЭ в рудных минералах Sn-W.

(a,b) Вольфрамит из кварцевой жилы Юбули демонстрирует относительный HREE по сравнению с касситеритом; (c) Касситерит из грейзенизированных гранитов Накенге демонстрирует отрицательную аномалию Ce (нормализованный Ce для хондритов/ $Ce^* = 2Ce/(La + Pr)$); (d) Касситерит из кварцевой жилы Юбули демонстрирует положительный Ce аномалия. Значения REE нормализованы для хондритов.

Значения аномалии Ce варьируются от 0,8 до 7,1 для касситерита II типа, 0,7–2,8 для касситерита I типа и 0,8–2,5 для вольфрамита. В вольфрамите, по сравнению с касситеритом, микроэлементы, включая Pb, Bi, Ba и HREE (рис. 10a, b), демонстрируют относительно более высокие концентрации, тогда как Ti, V, Ga, As, Zr, Ta и U ниже (рис. 10c, d; таблица 1, 2, 3 и 4).

Атомные соотношения, включая V/Fe (<0,07) и Ti/Fe (0,03–1,5), относительно ниже в касситерите типа II по сравнению с типом I (V/Fe и Ti/Fe составляют соответственно 0,03–0,2 и 0,1–2,3). Соотношения In/Ta (86,3–698,8) в касситерите II типа выше, чем в I типе (0,2–92,0). В вольфрамите соотношения In/Ta (1,4–4,7) и Al/Nb (<0,8) относительно ниже по сравнению с касситеритами.

3.3. Петрографические описания флюидных включений КИБ.

Флюидные включения (FIS) обнаружены в различных минералах КИБ, включая кварц, касситерит и флюорит. Мы отобрали вмещающие минералы на основе трех критериев: (1) петрография (голые граниты, граниты, содержащие Sn, и кварцевые жилы Sn-W); (2) взаимосвязь разрезов (кварцевые жилы, пересекающие либо гранит, либо метаосаждения); и (3) особенности изменения. Мы выбрали вмещающие минералы и их FIS следующим образом: (a) кварц в бесплодных гранитах (ДМБАР-1, ДМКАЙЛО-1 и БЕЙЛ-1; рис. 2); (б) кварц в гранитах, содержащих Sn (ДММОКА-2, ДММОКА-2-6, ДММОКА-2-4, ДММОКА-2-7, ДММОКА-2-8, ДММОГА-1 и ДМНАКЕ-1; рис. 2); (c) кварц в бесплодных кварцевых жилах, пересекающих гранит Sn (ДММОКА-2-7 и ДММОКА-2-8; рис. 2); (d) кварц в кварцевых жилах Sn-W, пересекающих метаосажденные породы (например, сланцы, DMYUB-1, ДММЕТ-1, ДМВАТ-1 и ДМНАКЕ-1; рис. 2 и 5c-g); (e) флюорит в бесплодных кварцевых жилах,

пересекающих минерализованный гранит Sn (DMMOKA-2-8; рис. 2 и 5a, b); и (f) касситерит в минерализованных кварцевых жилах и гранитах (DMYUB-1, DMMAKU-1, DMBAT-1 и DMNAKE-1; рис. 4g, h и 5c-g; табл. 5).

После детальных петрографических наблюдений идентифицировали скопления флюидных включений с когенетическим строением (FIAS) (рис. 11a, e, j), случайным образом сгруппированные (рис. 11b, f, k) или выровненные (рис. 11h, j, l) вдоль заживающей трещины или зоны роста.

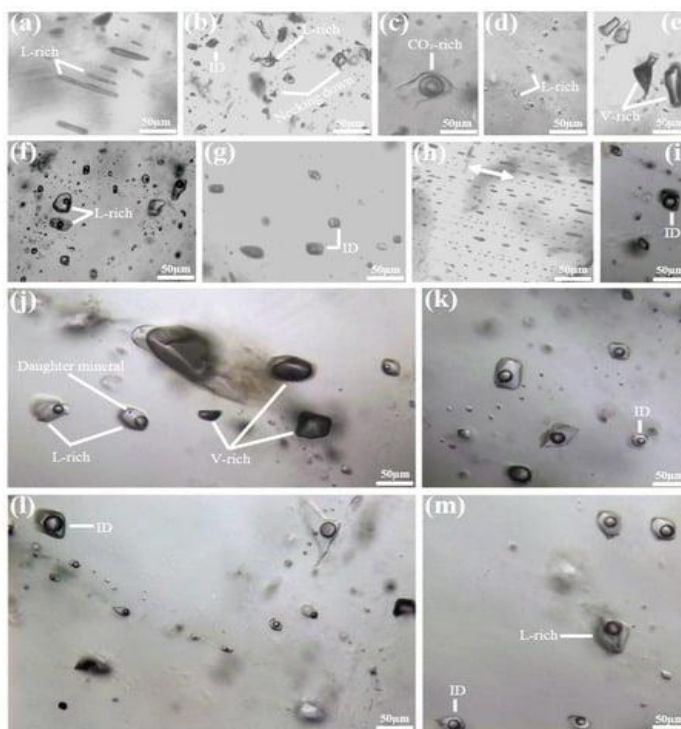


Рис. 11. Р Микрофотографии флюидных включений в КИВ:

(a) Первичные водные включения, богатые жидкостью и парами, в касситерите из кварцевых жил Макунджу; (b) Псевдосредние водные включения, средней плотности (ID), богатые жидкостью и парами, в касситерите из Накенге грейзен; (c) Водные включения, богатые жидкостью и парами, в касситерите из Накенге грейзен. углеродсодержащие включения, содержащиеся в кварце в граните с участка Мокама; (d) Включения, богатые водной жидкостью, содержащиеся во флюорите в бесплодных кварцевых жилах с участка Мокама; (e) Включения, богатые парами, содержащиеся в кварце в минерализованных кварцевых жилах с участка Батамба; (f) псевдосредние водные включения, богатые жидкостью, преобладающие в кварце в минерализованном граните с участка Мокама; (g) включения водного типа ID, содержащиеся в касситерите в кварцевых жилах с участка Юбули; (h) Сосуществующие водные включения, богатые жидкостью и парами, в касситерите в минерализованных кварцевых жилах с участка Макунджу, показывающие следы флюидных включений, вдоль зоны роста; (i) водные включения, богатые жидкостью и парами, в кварце в минерализованных жилах с участка Юбули; (j) Сосуществующие водные включения, богатые жидкостью и парами (кипящая совокупность), содержащиеся в кварце в минерализованном граните с участка Мокама; (k-m) Псевдосредние водные включения ID-типа, богатые жидкостью и парами, содержащиеся в кварце в граните с участка Мокама. В касситерите также присутствуют первичные и псевдосредние флюидные включения. Размеры пузырьков большинства богатых водной жидкостью включений, содержащихся в касситерите и кварце, оцениваются в 10-40 об.%; размеры пузырьков большинства богатых водной жидкостью включений, содержащихся во флюорите, составляют приблизительно 5-20 об.%. Белая стрелка в (h) показывает направление зоны роста.

Первичные FIAS редки в кварце и флюорите, в то время как вторичные и псевдосредние FIAS распространены. В касситерите мы наблюдали первичные (рис. 11a, h), вторичные и псевдосредние ассоциации (рис. 11a, b, g). Мы использовали псевдосредние и первичные FIAS, размещенные в касситерите, и псевдосредние FIAS для кварца и флюорита.

В кварце и касситерите выделили четыре типа включений на основе их фазового соотношения: (1) водные включения, богатые жидкостью (рис. 11a, b, f, l,m); (2) водные включения, богатые парами (насыщенные парами: рис. 11e, j); (3) водные включения

промежуточной плотности (ID: рис. 11b, g, i, k, l); и (4) водные углеродсодержащие включения (углеродсодержащие; рис. 11c). Солесодержащих включений в рассоле не наблюдалось. Размеры пузырьков (расчетные объемные%) в богатых жидкостью, насыщенных парах, ID и углеродсодержащих включениях составляют 10-30, 70-100, 50 и 70-90 соответственно. Несколько богатых жидкостью и содержащих углерод включений содержат темные дочерние минералы, возможно, оксиды или сульфиды металлов (рис. 11j). Некоторые комплексы флюидных включений (FIAS) в кварце в гранитах, содержащих Sn (например, участок Мокама, рис. 2), демонстрируют совместное наличие включений, богатых жидкостью и паром, возможно, “кипящий комплекс” (рис. 11j). Во флюорите преобладают включения относительно небольшого размера (<20 мкм в диаметре), богатые жидкостью (рис. 11d).

Трещины, размещенные в кварце, флюорите и касситерите, имеют различную форму, включая круглую, удлиненную, игольчатую, линзовидную, табличную, многоугольную, амeboидную и ботриоидную (рис. 11a–m). Несколько первичных ФИАС происходят вдоль зоны роста касситерита (рис. 11a, h). Некоторые трещины в кварце и касситерите демонстрируют особенности “сужения” (рис. 11b, f), которые не были включены в это исследование.

3.4. Микротермометрия FI и расчет плотности флюида-давления.

Микротермометрию флюидных включений (FI) проводили для богатых жидкостью включений, содержащихся в кварце, касситерите и флюорите в гранитах и кварцевых жилах (рис. 11a–m; табл. 5). Сообщается о кажущейся солёности (в мас.% эквивалента NaCl), температуре гомогенизации (T_h , °C), расчетных кажущихся глубинах (в основном по кипящим скоплениям) (рис. 11j), давлению (бар) и плотности (г/см^3) скоплений флюидных включений, богатых жидкостью (FIAs) (рис. 12a–d).

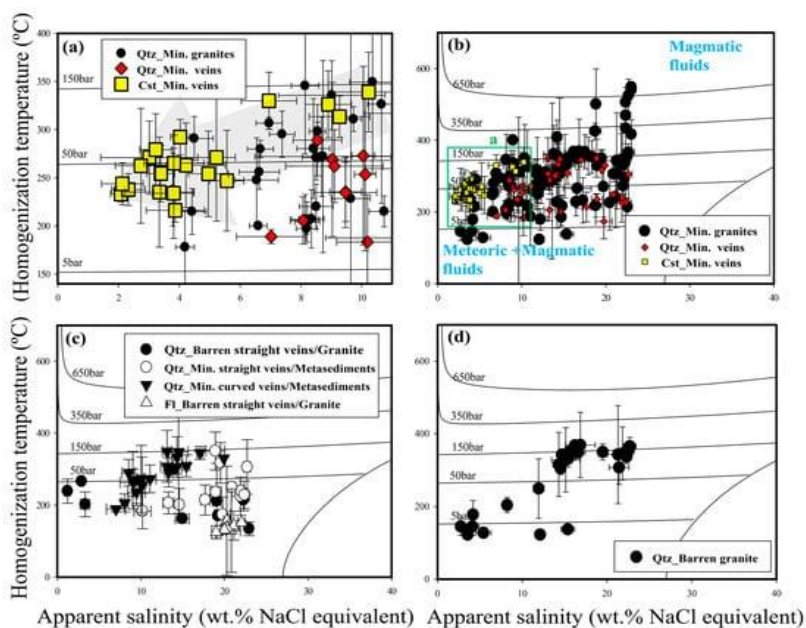


Рис. 12. Микротермометрические результаты FIAs KIB:

(a,b) Кажущиеся солености и температуры гомогенизации, измеренные по FIAS, размещенным в касситерите и кварце в жилах и гранитах. Серая стрелка в (a) представляет собой гипотетическую тенденцию смешения магматических флюидов с водой с низким содержанием T и слабосоленой; (c) Солености и температуры гомогенизации в FIAS, залегающих во флюорите и кварце из прямых и изогнутых жил, пересекающих метаосадочные отложения и граниты; (d) Солености и температуры гомогенизации в FIAS, залегающих в кварце из бесплодных гранитов. Изобарические кривые и солености были получены с использованием системы H₂O-NaCl. Результаты представлены в виде средних значений и стандартных отклонений (среднее $\pm 1\sigma$), рассчитанных на основе примерно 3-5 отдельно измеренных одиночных включений в пределах каждого FIAS.

В бесплодных гранитах FIAS, размещенные в кварце, демонстрируют диапазон солености от 3-23 мас. % и T_h 120-370 ° C (в среднем 280 ° C). Содержащие Sn равнотермические граниты демонстрируют аналогичный диапазон солености (4-23 мас.%), но несколько более широкий диапазон T_h (190-550 ° C) (рис. 12a, b). Кварцевые FIAS жил Sn-W, прорезающие метаосадочные породы, показывают диапазон солености (7-20 мас. %) и T_h (170-350 ° C). FIAS в бесплодных жилах, пересекающих минерализованные граниты, демонстрируют аналогичный диапазон солености (1-23 мас.%), но более низкую T_h (130-270 ° C) по сравнению с минерализованными жилами (рис. 12b, c). FIAS в Sn-содержащих грейзенизированных гранитах характеризуются соленостью (11-19 мас. %) и T_h (260-500 ° C) (рис. 12b), а в Sn-содержащих пегматитах диапазон солености составляет 7-18 мас.% и T_h 180-330°C (рис. 12b). Подводя итог, FIAS, содержащие кварц, в гранитах, содержащих Sn, демонстрируют относительно более высокую T_h (в среднем 310°C) по сравнению с бесплодными гранитами (в среднем 280°C). Вмещающие кварц FIAS в минерализованных кварцевых жилах Sn-W в метаосадочных породах показывают относительно более высокую T_h (в среднем 260°C) по сравнению с бесплодными кварцевыми жилами (в среднем 200°C) в минерализованных гранитах (рис. 12b, c). FIAS во флюорите в бесплодных жилах (рис. 12c) показывают соленость 15-22 мас.% и более низкую T_h (в среднем 140 ° C) по сравнению с кварцем (в среднем 260 ° C, рис. 12b, c) и касситеритом (в среднем 270°C, рис. 12a, b), содержащимися в минерализованных жилах Sn-W.

В целом, наблюдаем положительную корреляцию между соленостью T_h в FIAS, содержащихся в кварце и касситерите в Sn минерализованных гранитах и минерализованных жилах Sn-W (рис. 12a, b). Не наблюдалось такой положительной корреляции между минерализованными Sn-W жилами и бесплодными жилами (рис. 12c) и безрудными гранитами (рис. 12d). Диапазон солености (7-20 мас. %) и T_h (174-350°C), как правило, шире у кварца в минерализованных гранитах и минерализованных жилах по сравнению с касситеритом (солености 2-10 мас. % и T_h 216-339°C) в тех же гранитах и жилах. Соленость T_h , как правило, ниже в касситерите по сравнению с кварцем в минерализованных гранитах и жилах.

Видимые глубины были рассчитаны с использованием давлений, полученных в результате микротермометрических измерений кипящих скоплений, содержащихся в касситерите и кварце в жилах. Расчетные давления в кварце и касситерите составляют 120-600 бар, а кажущиеся глубины, по расчетам, составляют около 0,5-1 км (литостатическое давление) и 1-2

км (гидростатическое давление). Расчетные давления в граните выше, чем в жилах. Видимые глубины, рассчитанные по FIAS минерализованных гранитов, составляют приблизительно 3-5 км (гидростатические) и 2-3 км (литостатические). FIAS, содержащиеся во флюорите в жилах Баррен, демонстрируют относительно более высокую плотность (1,07–1,09) по сравнению с FIAS в кварце, содержащемся в тех же жилах (0,80–0,97).

3.5. Рамановская спектроскопия на FIAS.

Был проведен рамановский спектроскопический анализ пузырьковых частей включений, богатых жидкостью и паром, для идентификации газовых частиц во флюидных включениях (FIs). Кварцевые FIS в минерализованных гранитах и минерализованных жилах (Мокама и Накенге, рис. 2) показывают присутствие CH_4 , CO_2 , N_2 и H_2 (рис. 13a, b). Вмещающие касситерит FIAS содержат такие вещества, как CH_4 , CO_2 , N_2 и H_2 (рис. 13c).

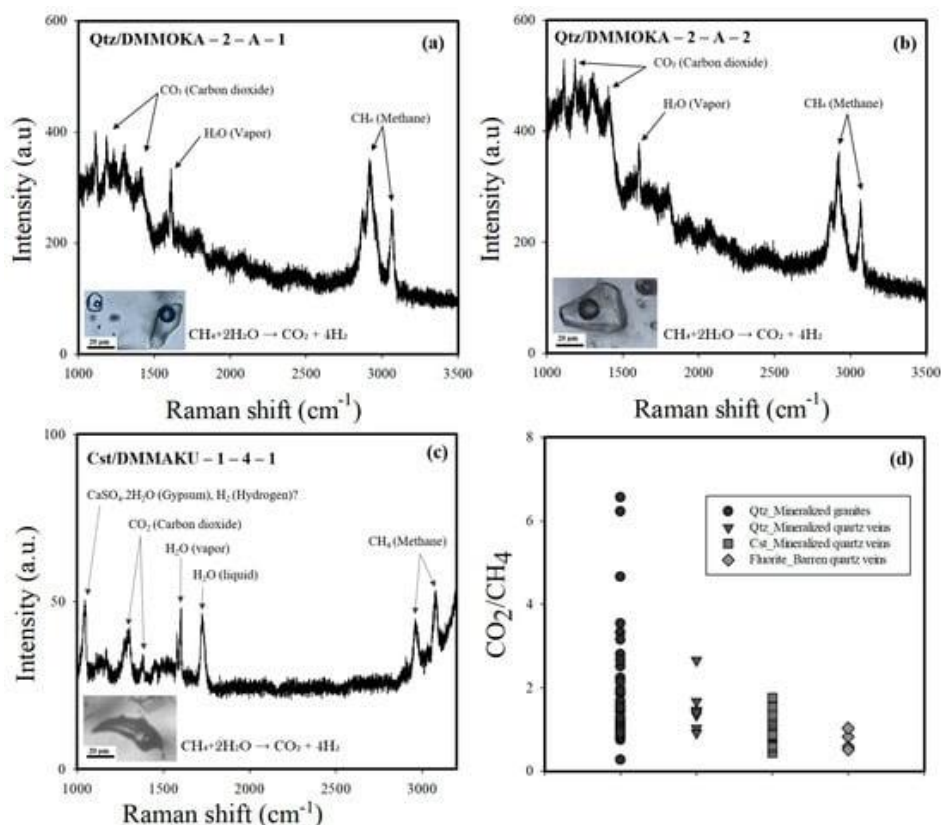


Рис. 13. Лазерная рамановская спектроскопия на пузырьковых участках FIs: (a,b) FIs, размещенный в кварце в минерализованных гранитах с участка Мокама; (c) FIs, размещенный в касситерите в минерализованных кварцевых жилах с участка Макунджу; (d) Соотношения CO_2/CH_4 , рассчитанные по интенсивности пика комбинационного рассеяния газа породы в FIs сравниваются между кварцем, содержащимся в минерализованных гранитах, кварцем и касситеритом, содержащимся в минерализованных кварцевых жилах, и флюоритом, содержащимся в бесплодных кварцевых жилах.

Коэффициенты интенсивности комбинационного рассеяния CO_2/CH_4 , рассчитанные по относительным максимальным высотам пиков на фоне включений, содержащих кварц, составляют 0,4–3,0 в минерализованных жилах и 0,4–7,2 в минерализованных гранитах; 0,5–2,1 для касситерита в минерализованных жилах; и 0,7–1,0 для флюорита в жиле баррен (рис. 13d). В целом, соотношения CO_2/CH_4 в кварцевых FIS в минерализованных гранитах выше по сравнению с кварцевыми и касситеритными FIS в минерализованных жилах (рис. 13d).

4. Обсуждение.

4.1. Структура и геохимия руд.

Наличие у касситерита более ярких (более высокая люминесценция) и более темных (более низкая люминесценция) зон под SEM-CL может быть вызвано неравномерным распределением микроэлементов и кристаллографической ориентацией. На изображениях SEM-CL зерен касситерита в КИБ показаны микротекстуры, включая колебательные (ростовые) зоны и замещения. Желтый прозрачный касситерит (тип I: светлая зона SEM-CL) сформировался раньше, чем темный полупрозрачный касситерит (тип II: темная зона SEM-CL). Петрографические исследования касситерита не смогли четко прояснить взаимосвязь между зональностью касситерита и распределением микроэлементов, в то время как несколько исследований показали, что касситерит с высоким содержанием Fe вызывает меньшую люминесценцию по сравнению с касситеритом с высоким содержанием Ti. В темном полупрозрачном касситерите (тип II) содержание Fe-W-U выше, чем в светло-прозрачном касситерите (тип I), который обогащен Nb-Ta-Ti, в то время как вольфрамит беден Nb-Ta, что отражает то, что касситерит образуется при относительно высокой температуре по сравнению с касситеритом.

В касситерите КИБ внутренняя колебательная структура чередующихся типов I и II коррелирует с распределением некоторых микроэлементов; Fe-Al-Ga-In-W относительно обогащены типом II, тогда как Ti-V-Zr-Nb-Ta обогащены типом I (рис. 9a-d; табл. 4). Касситерит КИБ содержит следы, включая Fe, W и V, представляющие окислительно-восстановительное состояние; W, Ti, Al, In и Ga чувствительны к гидротермальной температуре; а Ti, Nb и Ta могут указывать на процесс фракционирования причинной магмы. Соотношения V/Fe и Ti/Fe, являющиеся относительно более низкими в типе II по сравнению с типом I, могут быть интерпретированы как изменение гидротермального окислительно-восстановительного состояния во время изменения или взаимодействия флюид-жидкость. Соотношения In/Ta и Al/Nb в касситерите выше, чем в вольфрамите, что можно интерпретировать как более раннее высокотемпературное осаждение касситерита по сравнению с более поздними условиями образования вольфрамита, которые были относительно более холодными.

Изменение может повлиять на подвижность микроэлементов, таких как Fe (чувствительный к окислительно-восстановительным процессам), In (высокий в высокотемпературных магмоподобных флюидах) и Ga (высокий в гидротермальных флюидах от низкого до умеренного уровня) в гидротермальных флюидах. Высокие Ti и V в касситерите предполагают относительно восстановительные гидротермальные условия, а высокая W предполагает высокотемпературные флюиды. Высокий Zr обычно ассоциируется с системами

пералиновых гранитов, тогда как высокий Ta часто ассоциируется с пералиминозными пегматитами. Высокое содержание Al связано с высокоалюминиевыми гранитами. Касситерит из месторождений VMS демонстрирует более низкие концентрации Ta, Nb и Zr по сравнению с месторождениями, связанными с гранитом.

Что касается химического состава руды, вольфрамит относительно обогащен HREE (10-100 частей на миллион) по сравнению с касситеритом (0,1–10 частей на миллион) (рис. 10a, b). Аномальные значения Ce в минералах указывают на условия рудообразования, такие как их окислительно-восстановительное состояние. Касситериты с участков Накенге и Мокама (минерализованные граниты; рис. 2) демонстрируют контрастные значения аномалий Ce с касситеритом с участка Юбули (минерализованные жилы; рис. 2), что указывает на относительно разные окислительно-восстановительные состояния на каждом участке КИБ во время отложений касситерита и вольфрамита (рис. 10a-d; табл. 3 и 4). Текстуры касситеритовой руды, показывающие чередующиеся типы касситерита (типы I и II), коррелируют с колебательным поведением селективных микроэлементов (рис. 8b, c и 9a-d) и колебаниями значений аномалий Ce и соотношений CO₂/CH₄. Эти результаты предполагают смешение флюидов, возможно, восстановленных магматических флюидов с окисленной метеоритной водой во время выпадения касситерита, что будет обсуждаться далее со следующими результатами FIs.

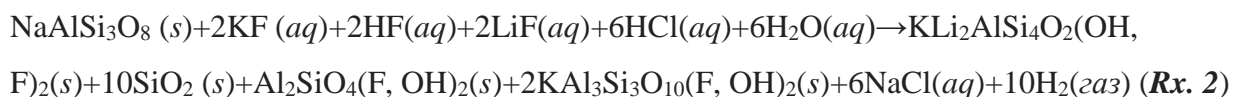
4.2. Гидротермальные изменения.

Ореолы изменения мусковит-кварца (±топаз-флюорит-турмалин) произошли в гранитах, содержащих Sn, в то время как мусковит-кварцевые комплексы доминировали вдоль минерализованных кварцевых жил Sn-W. Изменения в бесплодных гранитах (кварц-хлорит-мусковит-серицит) и кварцевых жилах (гематит-пирит) не были полностью описаны в этом исследовании.

Гидротермальные изменения, которые затронули минерализованные граниты и кварцевые жилы, способствовали ремобилизации и обогащению металлов. Присутствие мусковита в минерализованных гранитах в КИБ указывает на кислые условия, благоприятные для отложения W. В минерализованных кварцевых жилах присутствие мусковита указывает на кислую среду, и эта слюда интерпретируется как результат взаимодействия между поднимающимися гидротермальными флюидами и метаосадочными вмещающими породами, богатыми Al, как показано в реакции ниже: **(Rx. 1)**



В грейзенизированных породах присутствие слюд, таких как лепидолит, во внешних частях может быть интерпретировано как результат взаимодействия флюида с породой, в котором участвуют богатые Li флюиды:



Эти широко распространенные взаимодействия флюида с породой (гидротермальные изменения) в КИБ могут повторно мобилизовать металлы в гидротермальные флюиды, которые необходимы для осаждения вольфрамита. Возможная ремобилизация Fe и Mn из ближайших метаосадочных вмещающих пород предполагает литологический контроль W минерализации в жилах КИБ. Это подчеркивает важность изменений в характеристике и изучении Sn-гранитов и кварцевых жил Sn-W в КИБ.

4.3. Ограничения включения флюидов.

Кажущаяся палеоглубина, рассчитанная по FIAS гранитов (3-5 км по гидростатическому давлению), значительно ниже значений геотермометров с использованием минеральных пар гранат-биотит и хлорит (9-15 км) из тех же гранитно-минерализованных гранитов. Неизвестна причина расхождения в оценках глубины, но это может быть частично связано с нарушением равновесия в парах минералов, используемых для геотермометрических расчетов.

FIS, размещенные в кварце, содержат газовые фазы CO₂, CH₄ и редко N₂, тогда как FIS, размещенные в касситерите, содержат CO₂, CH₄, N₂ и H₂ (рис. 13). Аналогичные по возрасту Sn-содержащие граниты в Руанде содержат водные включения с низкой или умеренной соленостью (6-15 мас. % в эквиваленте NaCl), T_h 240-320 °C и расчетными палеоглубинами 3-4 км. Обнаруженные газовые соединения в FIS включают CO₂ (50-78 об. %), N₂ (11-40 об. %) и CH₄ (10-15 об. %), похожие на граниты КИБ аналогичного возраста в этом исследовании.

Sn переносится в виде хлорного комплекса в высокотемпературных флюидах магматического происхождения. Sn обычно выпадает в осадок раньше в относительно высокотемпературных условиях, тогда как W выпадает в осадок позже во время охлаждения. Гидротермальная геохимия, включая флюидные включения и термодинамическое моделирование, дает представление о магматико-гидротермальном формировании Sn-W. Сброс давления в магма-гидротермальном флюиде, который вызывает разделение фаз и повышает pH флюида, а также смешивание флюидов магматического происхождения с метеоритной водой, что может увеличить fO₂ и снизить температуру флюида, может усилить массовое выпадение вольфрамита. Растворимость W в гидротермальном флюиде благоприятна при переменной летучести кислорода и кислом pH.

Было продемонстрировано, что взаимодействие флюида с породой и смешивание флюидов между магматическими и метеоритными водами являются основными процессами формирования Sn. Результаты КИБ FIAS, показывающие переменные и широкие диапазоны T_h и кажущейся солености, могут свидетельствовать о смешении флюидов. Высокая T_h (190-

550°C) в гранитах, содержащих Sn, предполагает, что осаждение касситерита было вызвано магматическими флюидами, в то время как кварцевые жилы, содержащие Sn-W, демонстрируют более широкую и низкую T_h (130-350°C), что предполагает смешение магматической и более холодной воды. Они могли играть избирательную роль в выпадении раннего Sn (>200°C в связанных с гранитом отложениях Sn) и более позднего Sn-W (> 160°C в кварцевой жиле Sn-W) (рис. 12а, б).

FIS, размещенные в касситерите, содержат CO_2 , CH_4 , N_2 и H_2 (рис. 13а–с). Эти результаты комбинационного анализа, которые показывают обилие CO_2 и CH_4 , указывают на то, что минерализующие флюиды имеют либо магматическое происхождение, либо смешанные источники магматического и метеоритного происхождения, поскольку система минерализации Sn-W связана с кибаранским постороженным магматизмом. Потенциальным источником N_2 , обнаруженным в FIS, содержащем касситерит КИБ, может быть метеоритная вода или флюиды метаморфического происхождения, при этом несколько исследований стабильных изотопов (O и H) в кварце из гранита и кварцевых жил указывают на флюиды метаморфического происхождения. N_2 вместе с CO_2 или CH_4 во флюидах могут быть получены из органических C-содержащих (мета-) осадочных пород или магматических флюидов CO_2 - CH_4 , смешанных с метеоритной водой, богатой N_2 .

Соотношения CO_2/CH_4 , рассчитанные по высотам пиков Рамана в FIS, залегающих в кварце из минерализованных гранитов, относительно выше по сравнению с таковыми в кварце и касситерите, залегающих в минерализованных кварцевых жилах. Поскольку соотношения CO_2/CH_4 представляют относительные окислительно-восстановительные состояния, колебания соотношений могут указывать на изменение окислительно-восстановительных состояний в гидротермальных флюидах, образующих Sn-W (рис. 13d). Этот результат согласуется с изменяющимися значениями аномалии Ce в касситерите (рис. 10с, d).

4.4. Процессы осаждения Sn-W.

Геохимические условия и реакции, необходимые для переноса и осаждения Sn-W могут строго контролироваться (1) pH, (2) летучестью кислорода и (3) температурой (или давлением).

Реакция осаждения Sn: $\text{Sn(II)Cl}_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{aq}) \leftrightarrow \text{Sn(IV)O}_2 + 2\text{HCl}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{газ})$ (**Rx. 3**).

Осаждение касситерита требует (1) окисления, (2) повышения pH и (3) охлаждения. Окислительно-восстановительные изменения во время осаждения касситерита в КИБ могут быть отражены (а) колебаниями значений аномалии Ce в микротекстурированных касситеритах (рис. 10, в, d), (б) изменением соотношений CO_2/CH_4 в FIS (рис. 13, d) и (в) большими вариациями и положительными корреляциями T_h и солёности в FIS (рис. 12а-d). Требуется изменение валентного состояния Sn с+2 во флюидах до+4 в касситерите. Эти

геохимические особенности и особенности FIs убедительно указывают на окислительно-восстановительные колебания в гидротермальных флюидах, образующих Sn, в КІВ (рис. 10с, d и 14е). На окислительно-восстановительные изменения может влиять смешивание флюидов между горячей, высокосолевым магматической водой и более прохладной, малосолевой метеорной водой. Этот процесс смешивания и взаимодействия флюидов может охлаждать, а также окислять флюиды, содержащие Sn, магматического происхождения, способствуя селективному осаждению касситерита, образуя высококачественный Sn в КІВ.

W реакция осаждения: $\text{H}_2\text{WO}_4(\text{aq}) + \text{Fe}(\text{или Mn})\text{Cl}_2(\text{aq}) \leftrightarrow \text{Fe}(\text{или Mn})\text{WO}_4(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{aq})$ (**Rx. 4**).

Осаждение вольфрамита требует (1) жидкостного охлаждения, (2) повышения pH и (3) присутствия Fe (или Mn) во флюидах. Охлаждение жидкости и повышение pH могут быть достигнуты путем смешивания жидкости и гидротермальных изменений, разрушающего полевого шпат (например, мусковит). Поскольку в кварцевой жиле, расположенной в граните, не наблюдается выпадения вольфрамита, флюид магматического происхождения в КІВ может быть бедным по содержанию Fe или Mn. Требуется потенциальная ремобилизация FeCl_2 и MnCl_2 из вмещающих метаосадочных пород, что может объяснить селективное осаждение вольфрамита в кварцевых жилах, расположенных в метаосадочных породах.

5. Выводы

1. Микротекстуры касситерита, селективное распределение микроэлементов, включая аномальные значения Se, переменные соотношения CO_2/CH_4 во флюидных включениях, а также широкие диапазоны и положительно коррелирующие солености и T_h убедительно свидетельствуют о смешении флюидов между магматической (пониженной, горячей и высокосолевым) и метеоритной (более холодной и малосолевой) водой во время осаждения касситерита в граните и кварцевых жилах на КІВ.

2. Изменение породы (грейзенизация) и рудного минерала (замена текстуры) последовательно подтверждает идею массового осаждения высококачественных касситеритовых руд, которые требуют гидротермального изменения и смешивания жидкостей.

3. Вольфрамит, осажденному в кварцевых жилах, расположенных в метаосадочных породах, может способствовать ремобилизация Fe или Mn посредством повсеместных реакций изменения.

4. Процессы изменений и смешения флюидов могут быть ключевыми геологическими процессами, которые формируют высококачественный касситерит и вольфрамит в гранитах и кварцевых жилах КІВ.

Модель формирования Sn-гранитов и Sn-W кварцевых жил на КИВ показана на рисунке 14.

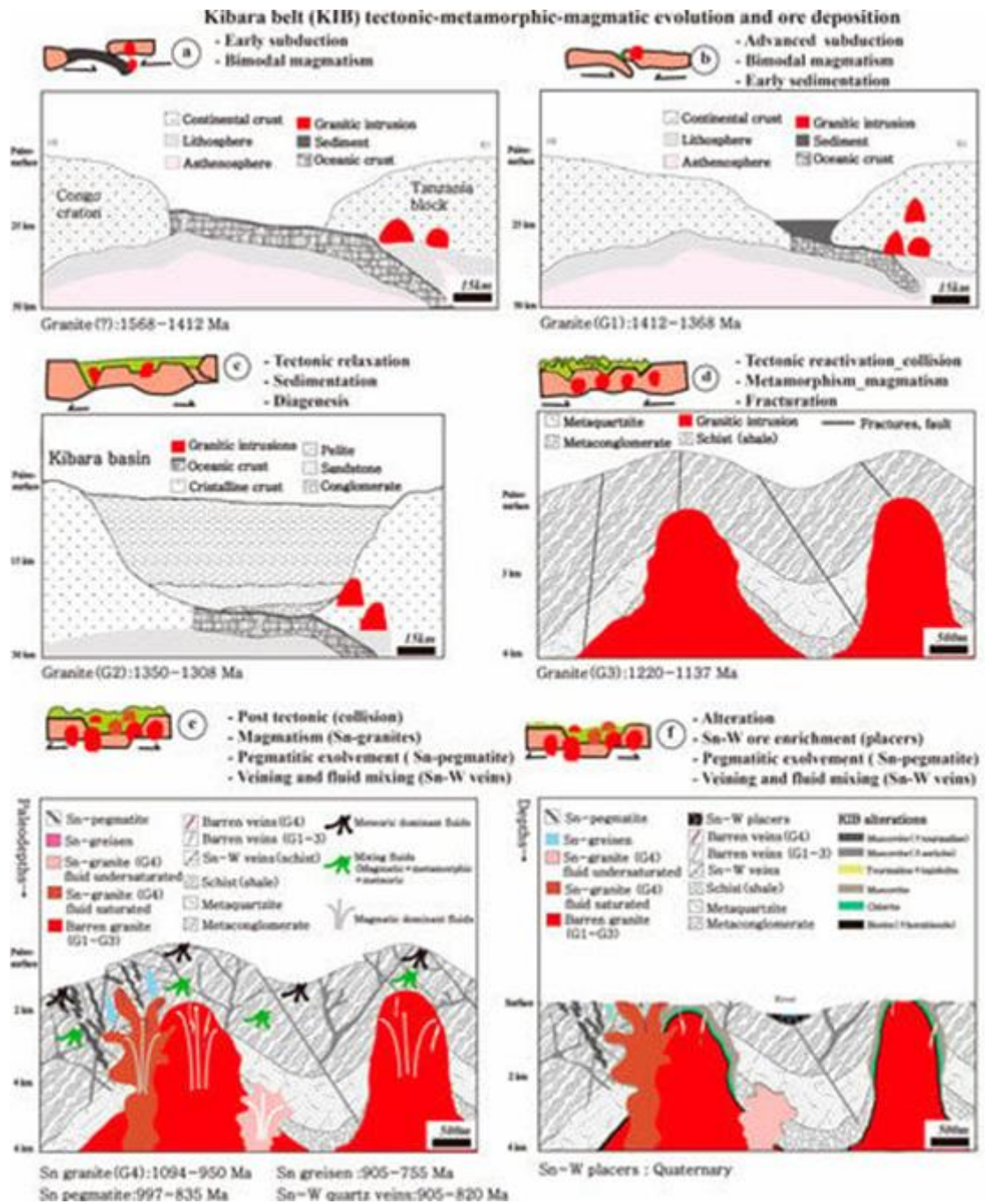


Рис. 14. Тектоно-магматическая, геохимическая модель формирования Sn-гранитов и Sn-W кварцевых жил: (a-d) Эволюция - от субдукции к осадконакоплению, региональному метаморфизму, синтетектоническому магматизму и коллизии; (e,f) Эволюция рудных прожилков - смешение флюидов, отложение руды и механическое выветривание.

5. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОРУДЕНЕНИЯ на основе теории фракталов и анализа Фрай *металлогенический пояс Ненцзян–Хэйхэ (СВ Китай)*

Введение

Трещиноватость является критическим фактором контроля минерализации гидротермальных месторождений. Это динамический канал движения и миграции минерализующих жидкостей, обеспечивающий пространство для отложения рудных тел. Для описания пространственной взаимосвязи между минерализацией и региональной тектоникой были предложены математические методы, такие как метод взвешивания доказательств, факторный анализ, анализ распределения расстояний, машины опорных векторов, случайный лес, теория фракталов и анализ Фрай. Среди них теория фракталов и анализ Фрай быстро развивались в последние годы в качестве эффективных средств количественного анализа структуры трещин и выявления пространственной взаимосвязи между распределением оруденения (точек) и трещинами. В качестве количественного метода описания природных явлений (или объектов неправильной формы) теория фракталов может извлекать детерминированные и регулярные ковариаты из сложных и неупорядоченных моделей, чтобы восстановить механизм формирования фрактальной структуры и вывести эволюцию системы из случайных эволюционных процессов. Фрактальная размерность - это размерная величина фрактала, которая является важным параметром для количественной характеристики. Изучение структуры трещин может количественно описать сложность структуры, что обеспечивает основу для оценки потенциала минерализации. Область структуры разлома с высоким значением фрактальной размерности обычно тесно связана с металлической минерализацией.

Анализ структуры трещин в районе горы Цзюйи в провинции южная Хунань, на основе метода боковых измерений показал, что высокие и низкие значения фрактальной размерности согласуются с интенсивностью минерализации в этом районе. Здесь применение фрактальной и мультифрактальной теории для анализа пространственного распределения и характеристик линеаментов предсказали местоположение участков медной минерализации. Используя значения фрактальной размерности разломов в регионе Сави в центральном Иране, было показано что известные месторождения расположены в районах с ее высокими значениями.

Анализ Фрай (т.е. анализ аллоцентрических расстояний) - это аналитический метод, используемый для изучения пространственного распределения случайных точек и оценки автокорреляции пространственного распределения деформации пород. Он обладает преимуществами простого и быстрого метода и широко используется для анализа пространственного распределения месторождений в связи потенциальными

рудоконтролирующими структурами. Анализ Фрай также может помочь спрогнозировать направление распределения минерализации в различных масштабах в трехмерном пространстве, которое трудно идентифицировать на исходных картах.

В пределах металлогенического пояса Ненцзян-Хэйхэ сформировался рудный район Дуобаошань-Дасиньтун. Здесь в последние годы, были выявлены крупные и средние рудные месторождения, такие как Дуобаошань, Туншань, Санкуанггоу, Чженгуан, Сандаованцзы, Юнсинь и др. Поэтому была выбрана эта сложная региональная структура, имеющая несомненный металлогенический потенциал, для проведения анализа фрактальной размерности и количественной взаимосвязи между разрывными структурами и пространственным распределением рудных объектов.

1. Геологические предпосылки.

Район расположен между Северо-Китайским и Сибирским кратонами, в самой восточной части Центрально Азиатского орогенного пояса (рис. 1А) и состоит в основном из серии микро континентов и блоков континентальных окраинных аккреционных комплексов различных свойств, включая блоки Эргуна, Синъань и Сонгнен- Блок Силинхот, а также блок Цзямуси и блок Синкай с запада на восток (рис. 1В).

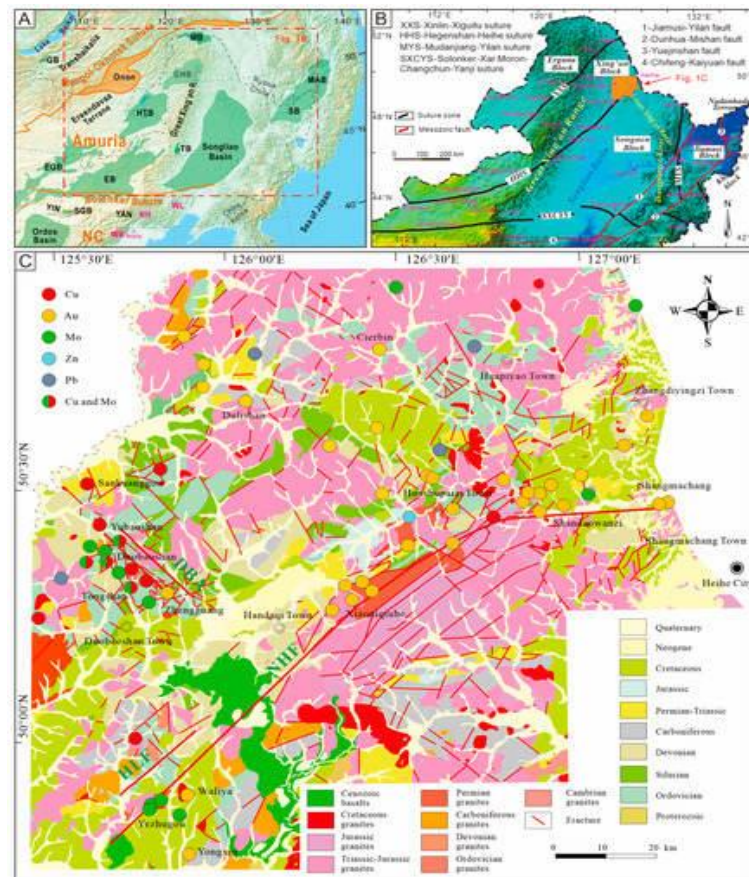


Рис. 1. (А) Структурная схема Центрально Азиатского орогенного пояса, (В) тектоническое зонирование северо-восточного Китая и (С) геологическая схема металлогенического пояса Ненцзян-Хэйхэ. ДВА—антиклинория Дуобаошань; NHF—разлом Ненцзян-Хэйхэ; HLF—разлом Хуолунменгоу.

В стратиграфии исследуемого района преобладают протерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения (рис. 1С). Протерозойская группа Синкайлинг, неопротерозойско–нижнекембрийская формация Галашан и формация Бэйкуанхэ в основном состоят из различных типов сланцев, гнейсов, амфиболитов и кислых вулканических пород. Палеозойско-ордовикская формация Туншань представляет собой совокупность песчаных сланцев. Формация Дуобаошань состоит из измененных андезитовых, дацитовых и вулканических осадочных пород. Формации Луохэ и Айхуэй состоят из метаморфического алевролита, туфообразного песчаника и переслаивающегося сланца. Силурийско–девонская система состоит из совокупности песчаника, песчаника и туфообразного песчаника с вулканическими породами между ними. Каменноугольно–пермская система в основном представляет собой совокупность песчаника, туфообразного песчаника и пирокластических пород. Мезозойские толщи - меловые формации Лунцзян, Гуанхуа, Цзюфэншань и Ганхэ представляют собой набор вулканических пород со средним содержанием щелочей и кислот, пирокластических пород и вулканических осадочных пород. Формация Нэнцзян состоит из песчаника и алевритовых аргиллитов. Кайнозой в основном состоит из базальта Даксионшань.

Интрузии состоят из палеозойских и мезозойских магматических пород. Меловые интрузии включают сиеногранит, щелочно-полевошпатовый гранит, монцонитовый гранит и гранодиорит, демонстрируя полный набор скоплений пород коллизионного строения, и линейно распределены в северо-восточном направлении в Дуобаошане и Дулишане. Юрские интрузивные породы в основном состоят из диорита, гранодиорита, монцонитового гранита и сиеногранита. Интрузии позднего триаса–ранней средней юры в основном состоят из габбро, монцонитового гранита, гранодиорита и кварц-диорита. Пермские интрузивные породы в основном состоят из монцонитового гранита, сиеногранита, монцонитового гранита и щелочно-полевошпатового гранита. Каменноугольные интрузии включают раннекаменноугольный гранитный комплекс и сиеногранит. Раннепалеозойские ордовикские интрузии в основном состоят из диорита, grano-диорита, гранодиорит порфира и позднеордовикских ультраосновных пород, обнаженных вблизи Хуолунмэня и месторождения меди Дуобаошань. Девонские интрузивные породы состоят из диорита, тогда как кембрийские интрузивные породы в основном включают монцонитовый гранит и гранодиорит.

Региональная структура представляет собой неоднократное наложение зон пластических, разрывных сдвиговых и складчатых деформаций в этом районе. Разлом Нэнцзян–Хэйхэ расположен между блоками Синьань и Сонгнен, распространяется в СВ направлении вдоль линии Нэнцзян–Нэнбэй-Бэйсихэ–Хэйхэ и простирается примерно на 180 км. Это региональный глубинный крупный разлом (рис. 1С), с палеозойскими и мезозойскими магматическими породами средней кислотности и кайнозойскими базальтами по обе стороны

разлома. Разлом Хуолунменгоу простирается на СВ протяженностью более 20 км, сформировавшись в конце раннего мелового периода (рис. 1С). Антиклинорий Дуобаошань с СЗ осью и изогнутым протяжением примерно в 20 км. Основные слои формации Туншань и два фланга формации Дуобаошань имеют различную стратиграфическую ориентацию (рис. 1С).

В районе было выявлено большое количество крупных и средних месторождений Au, Cu и Mo, таких как медно-молибденовые месторождения порфирового типа Туншань, Дуобаошань и Ежугуо; месторождения меди (молибдена) скарнового типа Санкуангоу и Юбаошань; эпиптермальные месторождения золота Чженгуань, Сандаованзи, Юнсин и проявления Pb-Zn минерализации (рис. 1С). Возраст минерализации указывает на то, что порфировые, полиметаллические и эпиптермальные рудные месторождения сформировались в позднем фанерозое.

2. Методы.

2.1. Предварительная обработка и картирование линеаментов.

Предварительная обработка изображений была разделена на четыре основных этапа: радиометрическая калибровка, атмосферная коррекция, обрезка изображения и объединение изображений. Сначала была выполнена радиометрическая коррекция данных изображения Landsat-8 OLI в исследуемом районе с использованием ENVI для преобразования исходных значений DN в коэффициенты отражения внешней атмосферной поверхности (или значения радиометрической яркости). Затем была выполнена атмосферная коррекция с использованием модуля FLAASH для уменьшения эффекта рассеяния в атмосфере. Наконец, изображения были обрезаны до исследуемой области и растянуты для получения пригодных для использования изображений. Был использован алгоритм Грама–Шмидта для объединения мультиспектрального изображения и изображения с панхроматической полосой с разрешением 15 м, чтобы улучшить пространственное и спектральное разрешение и облегчить конструктивную интерпретацию.

Чтобы выделить текстуру линий на ДДЗ, получили четыре полосы — OLI1, OLI2, OLI3 и OLI4 — которые были нормализованы и скорректированы с помощью предварительной обработки изображения и были выбраны для анализа главных компонент (РСА). Второй основной компонент использовался для сравнения, чтобы быть более благоприятным для извлечения линеаментов. Второй основной компонент был выбран для улучшения линии направленного фильтра с помощью окна сверточного фильтра оператора Собела размером 3×3, которое может выделить информацию о структуре трещин в соответствующем направлении изображений ДЗ и полезно для конструктивной интерпретации.

Автоматическое извлечение линеаментов было выполнено с использованием программного обеспечения PCI Geomatica для цифрового анализа и визуальной интерпретации. Используя линейный алгоритм PCI Geomatica для установки соответствующих базовых входных параметров (табл. 1) для оптимизации количества и качества выделяемых линий, алгоритм этого модуля состоит из трех этапов: распознавание границ, обработка порогов и извлечение кривой.

Табл. 1.

Принятые параметры для линейного алгоритма.

NO.	Parameters	Code	Values
1	Filter Radius	RADI	80
2	Edge Gradient Threshold	GTHR	10
3	Curve Length Threshold	LTHR	80
4	Line Fitting Error Threshold	FTHR	3
5	Angular Difference Threshold	ATHR	15
6	Linking Distance Threshold	DTHR	10

На первом этапе изображение края генерируется путем установки радиуса фильтра (RADI) в алгоритме обнаружения краев Canny. На втором этапе устанавливается пороговое значение градиента края (GTHR) для получения двоичного изображения. На третьем этапе двоичное изображение границ уточняется путем настройки порога длины кривой (LTHR) для подгонки отрезков к извлеченным пиксельным кривым, преобразуя их в векторную форму; затем генерируются полилинии путем указания максимальной ошибки подгонки с использованием соответствующего параметра порога прямолинейности (FTHR). Наконец, условия максимального порога угловой разности (ATHR) и максимального порога расстояния связи (DTHR) между двумя векторами, указанными для соединения, устанавливаются для выполнения соединения по полилинии, и результатом является векторная кривая. Ход конкретного метода построения линейной экстракции показан на рисунке 2.

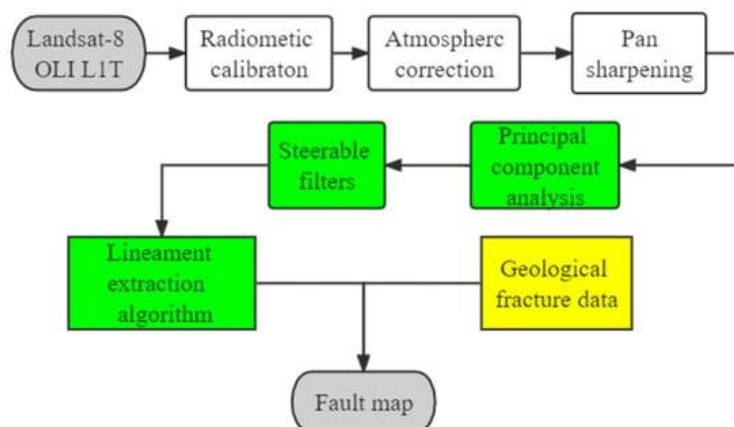


Рис. 2. Блок-схема методологии выделения линеаментов.

2.2. Фрактальная модель с подсчетом блоков

Теория фракталов широко применяется в области геологии с момента ее создания в 1970-х годах, особенно в количественном анализе структур трещин. Структуры разломов

представлены в виде серии нерегулярных линейных скоплений в плоскости, которые не могут быть описаны традиционной евклидовой геометрией в схеме распределения разломов. Степень фрактального самоподобия структурных фракталов количественно описывается теорией фракталов, а размерное фрактальное значение структур трещин используется в качестве количественного параметра для пространственного масштаба и сложности трещин. Для вычисления значения фрактальной размерности использовалось множество методов, включая размерность бокса, размерность емкости, размерность подобия, информационное измерение, ассоциативное измерение, хаусдорфово измерение, измерение Бригама и непрерывный спектр обобщенного измерения. Метод боксовых измерений обладает преимуществами простых принципов и удобства вычислений и является наиболее широко используемым методом для вычисления фрактальной размерности.

Когда исследуются все извлеченные линейные конструкции в исследуемой области, квадратная решетка с длиной стороны r , равной $L/2^n$ (где n - целое число), используется для покрытия информации о линеаментх для статистического анализа. Получено количество сеток $N(r)$, покрывающих линейные структуры в соответствующем масштабе, и если $N(r)$ и r удовлетворяют правилу степенного показателя, то есть уравнению (1), то объектом исследования является фрактал.

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (1)$$

где C и D - константы. Берем логарифм каждой части уравнения (1),

$$\log N(r) = -D \log r + \log C \quad (2)$$

Согласно уравнению (2), кривая $\log r - \log N(r)$ была построена и подобрана с использованием метода наименьших квадратов. Фрактальное значение D является абсолютным значением этого уравнения линейной зависимости, и получается коэффициент корреляции R^2 чем ближе значение R^2 к 1, тем лучше соответствует фрактальному графику и тем больше согласие с пропорциональной зависимостью в уравнении (1).

Этот метод использовался для вычисления значения фрактальной размерности и построения контурной карты фрактальной размерности. Это делается путем установки масштаба наблюдения r в качестве длины стороны L , рисования квадрата с $L = 137,6$ км, охватывающего все линейные конструкции в исследуемой области. Это выполняется путем изменения длин сторон квадрата, то есть $r = L/2, L/4, L/8, L/16 \dots$, деления исследуемой области на блоки и подсчета количества сеток, содержащих линейные конструкции в соответствующих масштабах. Количество сеток, содержащих конструкции, было рассчитано как $N(r)$. Кривые $\log r - \log N(r)$ были построены и подобраны с использованием метода наименьших квадратов для получения значения фрактальной размерности D и коэффициента корреляции R^2 .

2.3. Анализ Фрай.

Анализ Фрай изначально был аналитическим методом, используемым для изучения автокорреляции пространственного распределения деформации горных пород, который может выявить автокорреляцию пространственного распределения среди целевых тел элементов, расположенных вблизи точки в пространстве. Постепенно он был расширен для изучения относительного положения и пространственной связи между точечными элементами пространства. В последние годы метод анализа Фрай также получил хорошие результаты при изучении моделей пространственного распределения месторождений полезных ископаемых. Анализ Фрай реализуется путем построения автокорреляционной диаграммы Фрай (рис. 3), которая включает в себя трансляцию точечных объектов (также называемую диаграммой Фрай), в которой каждый точечный объект используется в качестве источника трансляции.

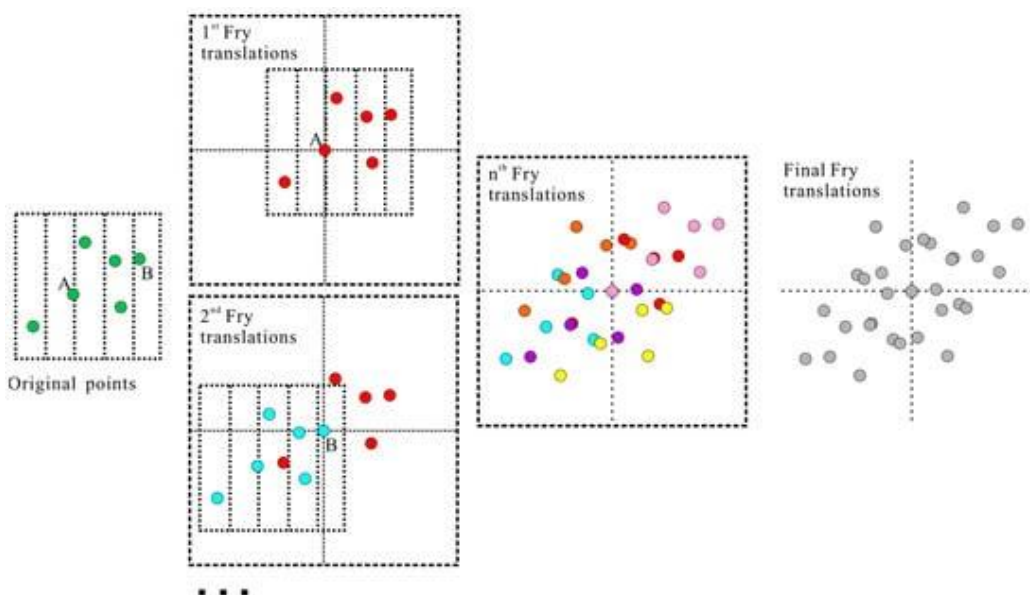


Рис. 3. Диаграмма точек анализа Фрай.

Конкретные шаги заключаются в следующем:

- (1) Исходный набор точек нанесен на график, а местоположение в центре нанесено и пронумеровано.
- (2) Копируется исходный набор точек, вторая точка помещается в центр графика, а все остальные точки поддерживаются на том же расстоянии и ориентации.
- (3) Положение каждой точки в скопированном наборе точек отмечено на новом графике (т.е. “Точками Фрай”).

Третья точка скопированного набора точек помещается в центр графика, а положения остальных точек записываются с сохранением расстояния от других точек. Этот процесс повторяется до тех пор, пока каждая точка в исходном наборе точек не будет использована в качестве центра графика.

Если число известных точек равно n , то после вертикальной проекции на графике получается в общей сложности $(n^2 - n)$ точек, которые называются диаграммой Фрай. Диаграмма Фрай увеличивает общую тенденцию и симметрию точечного объекта. Результаты анализа Фрай могут характеризовать отношения расстояния и ориентации между исходными точками данных относительно других произвольных точек, повышая способность идентифицировать шаблоны пространственного распределения исходных точек данных. В частности, анализ Фрай может быть использован для определения характеристик пространственного распределения исходных точек данных в случаях, когда точек данных не хватает или в точках данных подразумеваются очень сложные схемы пространственного распределения.

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Анализ результатов выделения линейных структур.

Распространение водной системы, микрогеоморфологии, литологических границ и других аспектов вдоль определенных направлений на изображениях ДЗ часто отражается линейными особенностями, которые в основном проявляются в виде линейно вытянутых хребтов, оврагов, обрывистых утесов или крутых выступов, темных линеаментов, светлых линеаментов и разделением различных оттенков. В этом исследовании, основанном на геологических данных, была выполнена подробная интерпретация структур трещин в исследуемом районе путем объединения визуальной интерпретации структур и автоматического выделения линейных структур (рис. 4), а также сочетания математических и статистических методов для описания длины, плотности, частоты, ориентации и других характеристик линейных структур.

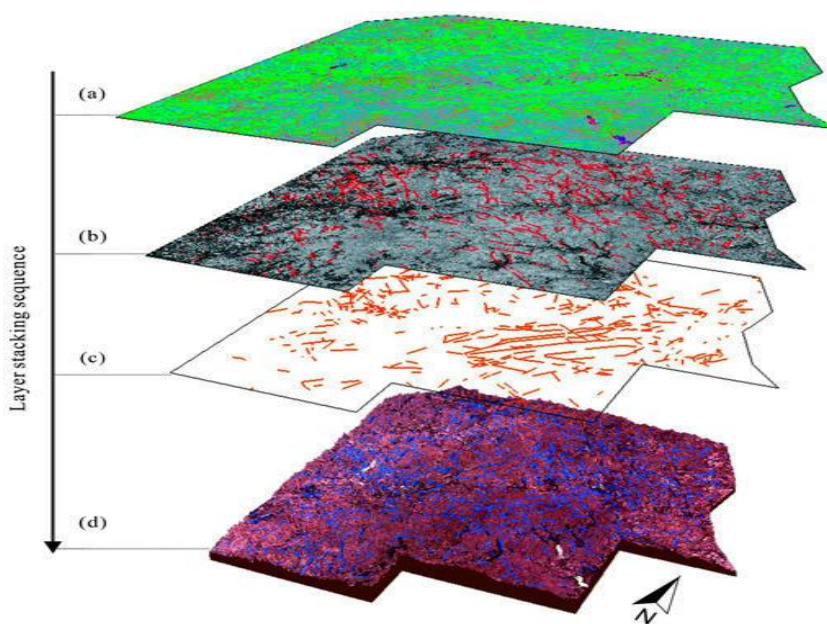


Рис. 4. Синтез суперпозиции линейных структур.

(а, б) извлечение линейных структур с СЗ фильтрацией изображения ДЗ; (в) линейные структуры геологической карты масштаба 1:250 000; (д) синтез всей линейной структуры.

С точки зрения интерпретации данных ДЗ, региональные структуры металлогенического пояса Ненцзян–Хэйхэ сегментированы по своей природе. Хрупкие структуры получили значительное развитие со времен мезозоя, и основная структура разломов имеет СЗ ориентировку, за которой следует СВ. Разломы СВ направления в основном фиксируются долинами реки с крутыми берегами и развитыми поверхностными скалами. Многие разломы СЗ направления расположены в шахматном порядке и смещены. Разлом Ненцзян–Хэйхэ состоит из нескольких параллельных разломов, которые обычно распределены вдоль бассейна реки Ненцзян. Разломы СЗ направления, как правило, плоские и зубчатые, демонстрирующие структурные особенности разрывов растяжения (кручения). Рельеф в основном представляет собой узкие долины и седловины в форме буквы “U” и “V”. На карте ДЗ в основном показаны разломы, которые разрезали мезозойские и более ранние геологические тела. Основной активный период разломов приходится на мезозой, в основном прорезая трещины СВ направления. Разломы СЗ направления являются основными структурами, контролирующими раннемеловые и кайнозойские базальтоиды. Узлы пересечения разломов характеризуется наибольшей интенсивностью кайнозойских базальтовых и ультрамафитовых вулканических пород, что позволяет предположить, что разломы характеризуются многофазной тектонической активностью.

Учитывая математические характеристики, суть анализа плотности линейных структур заключается в частоте встречаемости линейных структур в сетке, которая может быть использована для изучения характеристик распределения линейных структур в каждом направлении. В этом исследовании использовали инструмент анализа плотности в программном обеспечении ArcGIS для построения карты анализа плотности линейной структуры, которая визуально представляет разреженное и плотное распределение информации о линейной структуре в исследуемой области. В результате интерпретации ДДЗ было получено 1618 линейных структур во всем регионе со средней длиной 1813,35 м и максимальной плотностью 1,12 структур на км² (рис. 5а, б)

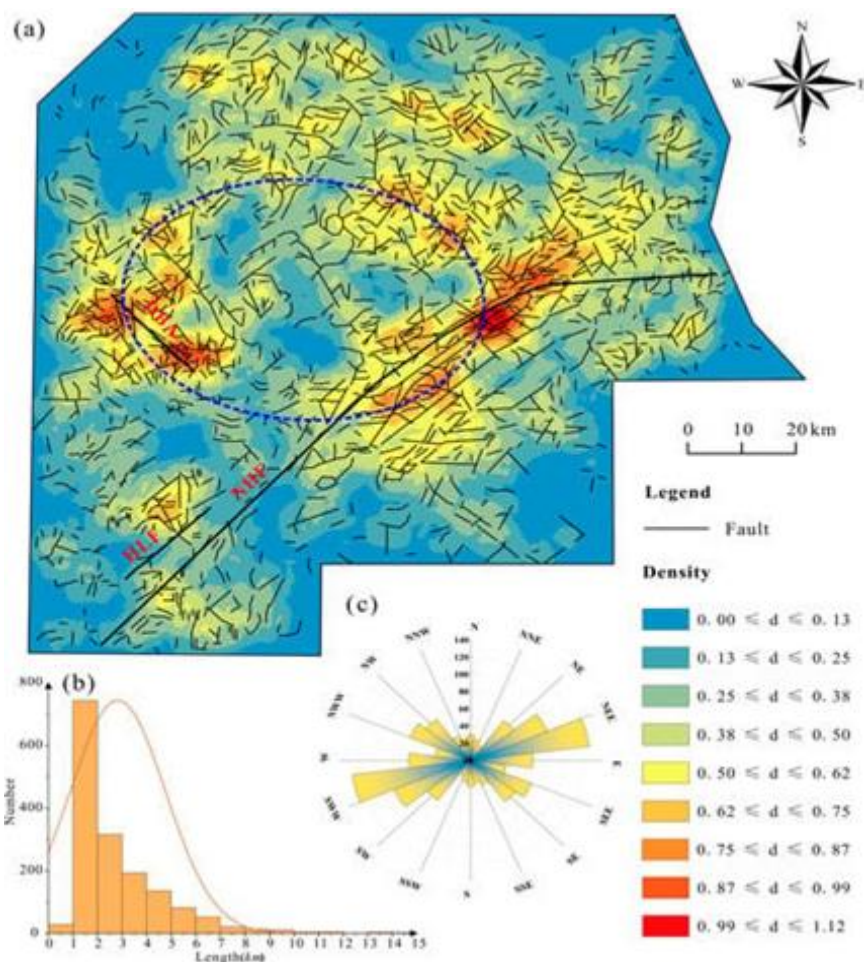


Рис. 5. (а) Карта плотности линеаментов, (б) Карта длин линеаментов и (с) карта распределения ориентации линейных структур.

Области с высокой плотностью линеаментов (значения плотности от 0,62 до 1,12) примерно показывают субкольцевую форму с низкими, средними и высокими сторонами. Локальные районы с высокой плотностью (значения плотности более 0,87) в основном распределены в центрально-восточной и центрально-западной частях, которые обычно простираются в СВ и СЗ направлениях. Между тем, северный и южный сектора характеризуются более мелкими вторичными разломами (рис. 5а).

Диаграмма ориентации линеамента "Роза" отражает структуру распределения ориентации. В ориентации структуры на рисунке 5с преобладает направление NEE, за которым следует направление NWW. Это согласуется с ориентацией основных глубинных разломов в регионе, включая разломы Ненцзян–Хэйхэ, Дуобаошань и Хуолунменгоу. Статистические результаты согласуются с особенностями изображения, показанными на приведенной выше карте плотности линеаментов, отражающей основную схему распределения направления разломов в исследуемой области.

3.2. Анализ линейных конструкций на основе фрактальной размерности.

Приведенный выше анализ карты показывает общую корреляцию между концентрацией рудных месторождений и расположением основных разломов. Однако теория фракталов

может быть использована для точного описания сложных структур и количественного выявления закономерности скрытых локальных структур. Размер фрактального измерения является всеобъемлющим показателем количества, масштаба, комбинации и динамики, а также количественным параметром сложности структур. Чтобы всесторонне охарактеризовать пространственное распределение линейных структур, необходимо более реалистично отразить контроль линейных структур за переносом и накоплением минерализованных гидротермальных флюидов. В этом исследовании метод фрактальной размерности используется для вычисления размерных фрактальных значений линейных структур в этом регионе. При фрактальном расчете исследуемая территория делится на уровни решетки, соответствующие тектоническому масштабу, поэтому сравнение значений общего и разнонаправленного размера трещин может в определенной степени объяснить сложность глобальной металлогенической структуры в исследуемой области и реализовать анализ взаимосвязи связей с распределением залегания рудных месторождений.

Как показано на рисунке 6, значения фракталов хорошо линейно коррелируют с $\text{Log } N(r)$. Общая фрактальная тектоническая размерность исследуемой области составляет 1,622 с высоким коэффициентом корреляции ($R^2=0,996$). Таким образом, линейные структуры в исследуемой области демонстрируют статистическое самоподобие и фрактальные характеристики. Для дальнейшего изучения фрактальных характеристик линейных структур в разных направлениях были рассчитаны фрактальные размеры линейных структур в северо-восточном и северо-западном направлениях, поскольку северо-восточное и северо-западное направления были доминирующими направлениями разлома в области, как упоминалось в предыдущем разделе. На основе теории фракталов и уравнения (2) значения D_{NE} и D_{NW} были рассчитаны как 1,543 и 1,498 ($R^2>0,9$) соответственно (рис. 6). Результаты показывают, что значение фрактальной размерности в СВ направлении больше, чем в СЗ, указывая на то, что первое направление более активно и развито.

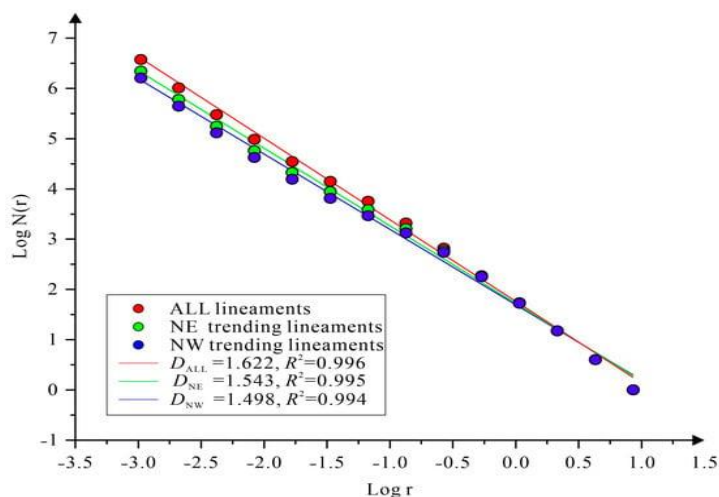


Рис. 6. Фрактальная размерность линеаментов в исследуемой области.

Результаты предыдущих исследований показывают, что размер фрактальных измерений количественно описывает сложность и нестабильность активности трещиноватости, которая способствует образованию крупных и сверхкрупных рудных месторождений, отражая пространственную и временную неоднородность и различия в фрактальной геометрии эволюции системы трещиноватости в исследуемом районе, таким образом, напрямую влияя на распределение рудных месторождений (точек). Фрактальные характеристики являются средством количественной характеристики интенсивности и пространственного распределения активности разрушения.

По сравнению с другими минерализованными районами фрактальные размеры исследуемой области находятся в диапазоне от среднего до верхнего и значительно выше, чем у Китайского континентального разлома, что указывает на то, что очертания области более сложные и активные (табл. 2).

Табл. 2.

Сравнение характеристик фракталов с другими областями.

NO.	Area	Fractal Dimension	Data Source
1	All lineaments	1.622	This study
2	The NE lineaments	1.543	This study
3	The NW lineaments	1.498	This study
4	Duobaoshan area structure, Heilongjiang	1.754	[82]
5	Northwest Structure of Dayao Mountain in Guangxi	1.689	[22]
6	Central fault zone of Sichuan Basin, China	1.530	[83]
7	Tongling ore concentration area fracture	1.279	[71]
8	East Kunlun Qimantage Hutouya polymetallic ore field fault	1.085	[84]
9	Shanghang-Yunxiao fault zone, China	1.360	[70]
10	Linear structure in the Guangxi area	1.335	[85]
11	Jiuyishan regional fault in southern Hunan	1.116	[20]
12	Chinese mainland fracture	1.237	[86]

Для дальнейшего анализа характеристик пространственного распределения линеаментных фрактальных объектов исследуемая территория была разделена на квадраты со сторонами длиной 8,6 км. Каждый блок площадью 8,6 км² был разделен на блоки размерами 4,3, 2,15, 1,075, ... и 0,00105 км. Контуры фрактальных измерений были нанесены с использованием интерполяции кригинга (рис. 7).

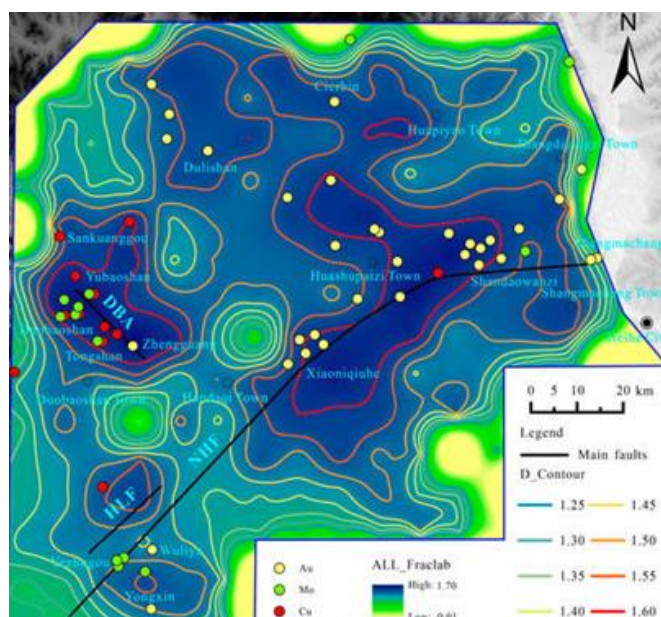


Рис. 7. Контурная карта фрактальной размерности линеаментов в исследуемой области.

Как показано на рисунке 7, общая фрактальная размерность исследуемой территории высока, а линейная структура соответствует закономерности пространственного распределения, показывая распределение в основном вблизи глубинных структур, таких как антиклиналь Дуобаошань и разлом Ненцзян-Хэйхэ. Это важные рудоправляющие, и рудовмещающие структуры. Высокоценные фрактальные области линеаментов СВ направления сосредоточены вблизи месторождений золота Юнсинь, Сяоницюхэ и Сандаованьцзы, тогда как более высокие значения фрактальной размерности линеаментов СЗ направления соответствуют областям, в основном распределенным в Дуобаошане, Чжэнгуане и Хуашупайцзы.

Анализ поверхности тренда - это метод регрессионного анализа, который использует метод наименьших квадратов для подгонки двумерной нелинейной функции для анализа пространственного распределения и тренда геологических переменных. Анализ поверхности тренда фрактальной размерности может быть использован для оценки пространственного распределения структурных особенностей разломов, выявляя региональные закономерности структурных изменений. Используя модуль Geostatistical Wizard в ArcGIS для получения фрактальной размерности линеаментов 10-го порядка, нарисована 10-уровневая карта тенденций (рис. 8).

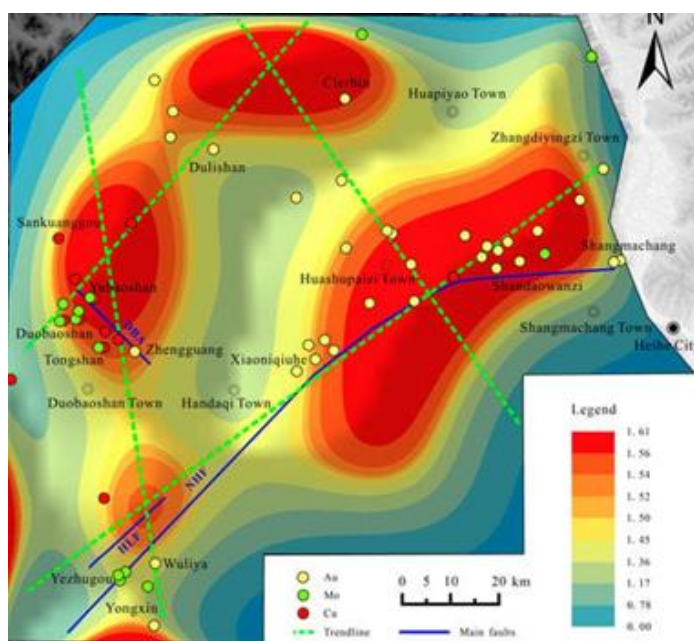


Рис. 8. Десятиступенчатая карта тенденций фрактальных измерений линеаментов в исследуемой области.

Как можем видеть, четыре линии тектонического распределения образуют четкую ромбическую сетчатую структуру, в которой линия СВ тренда на юго-востоке близка к разлому Ненцзян-Хэйхэ, линия СЗ тренда на юго-западе идентична антиклинорию Дуобаошань. СЗ линия тренда на северо-востоке не имеет соответствующих ей крупных разломов, она затронута небольшими разломами. Путем наложения известных рудных

месторождений на карту было обнаружено, что месторождения золота Чженгуан, Вулия, Сандаованзи, Шангмачанг и другие известные рудные месторождения в основном распределены в области средней и высокой размерности или вблизи нее и имеют распределение типа ромбической сетки вокруг линии тренда, что указывает на то, что область с высокой размерностью линейного фрактала имеет хорошую взаимосвязь с распределением известных рудных месторождений.

Карты Фрай были построены путем выбора 33 месторождений золота (точек), 12 месторождений меди (точек) и 13 месторождений молибдена (точек) в исследуемой области с использованием программного обеспечения ArcGIS. В качестве исходных изображений использовались карты пространственного распределения (рис. 9а), содержащие местоположения известных месторождений золотых, медных и молибденовых руд, и п примеров перемещения рудных точек были использованы для получения трех изображений Фрай, содержащих в общей сложности (n^2-n) движущихся точек, как показано на рисунке 9б. Точки Фрай были рассчитаны как 10° сдвиги в направлении вектора от центральной точки к любой другой точке для статистического анализа для получения диаграммы розы (рис. 9с). Взаимосвязь между тектоническими тенденциями и тенденциями минерализации в этом районе обсуждается путем сравнения результатов, полученных из графиков Фрай и Роуз, следующим образом. Пояс металлогенических трендов является потенциальной зоной минерализации, согласно анализу пространственного распределения месторождений (точек), структурной фрактальной размерности и закономерностям распределения при анализе тенденций.

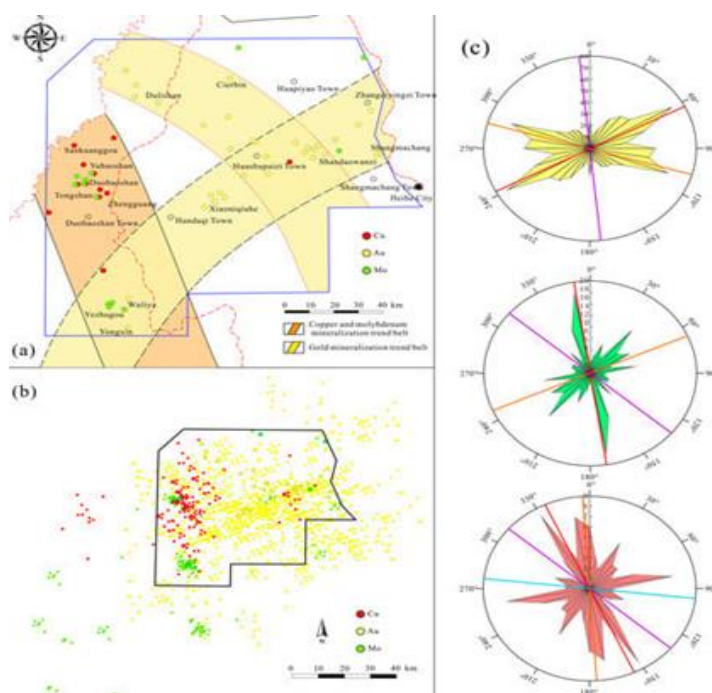


Рис. 9. Анализ Фрай распределения руды в исследуемой области.

(а) карта распределения основных минералов; (б) карта анализа Фрай; (с) диаграмма тенденции минерализации металлов в розовом цвете (желтый представляет золото, зеленый - молибден и красный - медь).

Золоторудная минерализация имеет две основные тенденции, СВ и СЗ направления (рис. 9а), в которых СВ направление (60-70 °) является наиболее доминирующим, а СЗ направление (280-290°) является преобладающим вторичным направлением. Направление NEE простирается от Юнсинь до Чжандиинцзы, в основном распределяя первичные месторождения золота Вулия, Юнсинь и Сяоницюэхэ. СЗ направление простирается от Дулишаня до Ханьдаки, в основном распределяя крупные месторождения золота Дулишань и Сандаованьцзы. Часть исследуемой территории, где пересекаются направления NEE и NWW, представляет собой плотную зону золотого оруденения по всему региону, которая является областью с потенциалом преимущества золотого оруденения по всему региону.

Общая тенденция минерализации меди - северо-западное направление (340°-350°) является наиболее обширным доминирующим направлением минерализации меди. По сравнению с медной минерализацией, наиболее значительным преобладающим направлением молибденовой минерализации является СЗ направление (350°-360 °). Крупные месторождения, такие как Дубаошань, Чженгуан и Туншань, связаны со структурой СЗ направления. Пояс трендов минерализации Cu-Mo простирается в СЗ направлении вдоль пояса от Санкуангоу до Юнсиня, и пересечение с поясом трендов золотой минерализации в направлении NEE является потенциальной областью для минерализации Au-Cu-Mo.

4. Выводы

В этом исследовании линейные структуры металлогенического пояса Ненцзян-Хэйхэ были выделены путем комбинирования визуальной интерпретации и автоматического извлечения. Характеристики пространственного распределения линейной структуры и рудных месторождений были изучены и проанализированы с использованием метода фрактальной размерности и анализа Фрай. Результаты этого исследования следующие.

(1) Степень структурированности исследуемой территории является сложной, с СЗ и СВ направлениями в качестве основных. Районы с высокой плотностью оруденения сосредоточены в центрально-восточном и центрально-западном секторах.

(2) Фрактальные размеры NE, NW и общих линейных структур равны 1,543, 1,493 и 1,622 соответственно. Области фрактальной размерности с высоким значением распределены в ромбовидном пространстве распределения, которое сильно связано с известным распределением месторождений.

(3) Распределение минерализации в исследуемой области в основном контролируется разломами. Золоторудная минерализация демонстрирует две основные тенденции минерализации в направлениях NEE и NWW, а область пересечения характеризуется плотной золотой минерализацией. Основным направлением тренда пояса тенденции минерализации

Cu–Mo является СЗ, а область пересечения с поясом тенденции золоторудной минерализации в СВ направлении является областью потенциальной минерализации Au–Cu–Mo.

6. ДДЗ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ в регионах, покрытых растительностью: методы, проблемы и возможности

Введение.

Точное литологическое картирование имеет важное значение при ГРП. Используя отличительные спектральные характеристики горных пород, ДДЗ облегчает геологическое картирование. Однако обнаружение информации о горных породах в районах, покрытых растительностью, создает проблемы из-за слабых сигналов и помех от растительного покрова. Даже при растительном покрове, составляющем чуть более 10%, информация о недрах может быть сильно затемнена или полностью скрыта. Следовательно, извлечение литологической информации в районах, покрытых растительностью, является сложной задачей в современных геологических исследованиях.

Были определены три основных подхода для устранения препятствий растительности при литологическом картировании. Первый подход фокусируется на получении литологической информации с помощью метода подавления растительности (VSM). Второй подход использует анализ спектрального смещения (SMA) для разложения и извлечения целевой информации, в частности литологических характеристик. Третий подход включает косвенную классификацию с использованием ряда алгоритмов, таких как классификация с максимальным правдоподобием (MLC), машины опорных векторов (SVM), случайный лес (RF), искусственные нейронные сети (ANN) и алгоритмы глубокого обучения (DLAs), что значительно облегчает процесс косвенной литологической идентификации с разработкой машинного обучения (ML).

В последние годы область литологической идентификации выиграла от достижений в области искусственного интеллекта и доступности разнообразных наборов ДДЗ. Среди этих наборов данных спутники серии Landsat стали основным выбором для исследователей при составлении литологических карт районов с растительностью. Их высокая экономическая эффективность, широкий охват и высокое пространственное разрешение эффективно идентифицируют информацию о растительности и литологии почвы, обеспечивая прочную основу для литологической идентификации. Однако важно отметить, что точность извлечения информации ограничивается явлением смешанных пикселей и потерей информации в результате низкого пространственного разрешения. Усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения (ASTER) с мультиспектральными (15 м) и тепловыми инфракрасными (TIR) (30 м) данными позволяет извлекать спектральные и тепловые характеристики для анализа литологии поверхности. Sentinel-2 предоставляет мультиспектральные данные с высоким пространственным разрешением (до 10 м), которые подходят для крупномасштабной литологической идентификации. Кроме того, WorldView-3 и

WorldView-4 предлагают мультиспектральные изображения высокого разрешения и TIR, позволяющие фиксировать детали поверхности и спектральные характеристики. Усовершенствованные гиперспектральные датчики, такие как Earth Observing-1 (EO-1), PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA) [35], программа картирования и анализа окружающей среды (EnMAP) и гиперспектральный инфракрасный тепловизор (HyspIRI), обеспечивают более широкий спектральный диапазон и более высокое разрешение, облегчая точную литологическую идентификацию и анализ минералов. Более того, китайские спутники высокого разрешения, включая Zhongzi Resources Satellite-1 (ZY-1), ZY-3 и серии Gaofen (GF), охватывают спектры в видимой (VIS), ближней инфракрасной (NIR) и средней инфракрасной областях спектра, создавая тем самым надежную базу данных для детальных литологических исследований.

Несмотря на заметные достижения оптических датчиков в литологической идентификации, они по-прежнему сталкиваются с определенными проблемами. Мультиспектральные изображения подвержены различным факторам, таким как освещенность и погодные условия, ограничения спектрального разрешения и сложный характер геологических единиц. Аналогичным образом, гиперспектральные изображения высокого разрешения подвержены спектральной путанице, сложностям в обработке и анализе данных и атмосферным помехам. Напротив, технология радара с синтезированной апертурой (SAR) может решить некоторые из этих проблем и предлагает преимущества, в том числе независимость от погодных условий, детальный захват текстурных особенностей и высокую чувствительность к физическим свойствам поверхности. С-диапазон (4-8 ГГц) обеспечивает высокое пространственное разрешение, фиксируя микроскопические детали структуры горных пород и отражая тонкие литологические вариации и различия в отражательной способности. С другой стороны, L-диапазон (1~2 ГГц) обладает способностью проникать сквозь растительность и неглубокие поверхностные покровы, непосредственно получая информацию о коренных породах. Хотя X-диапазон частот (8~12 ГГц), возможно, обычно не используется для прямой идентификации литологии в приложениях ДЗ, он все же может способствовать усилиям по идентификации литологии, предоставляя ценную информацию с помощью высокоточных топографических данных. Sentinel-1, поляриметрическая SAR (Pol-SAR) и SAR типа фазированной решетки L-диапазона (PALSAR) наиболее предпочтительны для составления литологических карт. Исследования показали, что радиолокационные данные, как правило, имеют более низкое пространственное разрешение по сравнению с оптическими изображениями, а сбор и обработка радиолокационных данных могут быть сложными. Следовательно, полагаться исключительно на данные SAR для литологического картирования может быть не оправданным.

Проблема при составлении литологических карт в районах, покрытых растительностью, заключается в неспособности одного типа ресурса данных точно охарактеризовать единицы горных пород. Учитывая корреляцию между литологией и такими факторами, как растительность, топография, температура, влажность и т.д., косвенная литологическая идентификация может быть достигнута с помощью методов РС из нескольких источников или интеграции РС со вспомогательными данными. Эта стратегия широко использовалась в практических геологических исследованиях и ГРП, что привело к замечательным достижениям. Стоит отметить, что объединение данных из нескольких источников создает многомерные объекты с многочисленными переменными. Однако использование всех этих переменных может создавать вычислительные проблемы для алгоритмов машинного обучения (MLAS) и не всегда может давать удовлетворительные результаты из-за того, что некоторые переменные являются сильно коррелированными, зашумленными, избыточными или неактуальными. Поэтому выбор оптимальных переменных признаков имеет решающее значение для достижения удовлетворительных результатов классификации.

Цель этой работы - обеспечить теоретическую, техническую и методологическую поддержку для дальнейших работ по составлению литологических карт в районах, покрытых растительностью, путем обобщения существующих исследований.

1. ДДЗ.

1.1. Оптические снимки ДЗ.

Спутники Landsat оснащены множеством мультиспектральных датчиков, включая мультиспектральный сканер (MSS) на борту Landsat 1-5, тематический картограф (TM) на борту Landsat 4 и 5, усовершенствованный тематический картограф Plus (ETM+) на борту Landsat 7, оперативный датчик изображения земли (OLI) и тепловой инфракрасный датчик (TIRS) на борту Landsat 8 и оперативный датчик изображения земли 2 (OLI-2) и TIRS-2 на борту Landsat 9, как показано в таблице 1.

Табл. 1.

Информация Landsat (L) о диапазоне частот (B), длине волны (L) и разрешении (S) 4-5/7/8/9

L4-5	L (µm)	S (m)	L7	L (µm)	S (m)	L8	L (µm)	S (m)	L9	L (µm)	S (m)
B 1	0.45-0.52	30	B 1	0.45-0.52	30	B 1	0.43-0.45	30	B 1	0.43-0.45	30
			B 8	0.52-0.90	15	B 2	0.45-0.51	30	B 2	0.45-0.51	30
B 2	0.52-0.60	30	B 2	0.52-0.60	30	B 3	0.53-0.59	30	B 3	0.53-0.59	30
B 3	0.63-0.69	30	B 3	0.63-0.69	30	B 4	0.64-0.67	30	B 4	0.64-0.67	30
B 4	0.76-0.90	30	B 4	0.77-0.90	30	B 5	0.85-0.88	30	B 5	0.85-0.88	30
						B 6	1.57-1.65	30	B 6	1.57-1.65	30
B 5	1.55-1.75	30	B 5	1.55-1.75	30	B 7	2.11-2.29	30	B 7	2.11-2.29	30
B 7	2.08-2.35	30	B 7	2.08-2.35	30	B 8	0.50-0.68	15	B 8	0.50-0.68	15
						B 9	1.36-1.38	30	B 9	1.36-1.38	30
B 6	10.40-12.50	120 * (30)	B 6	10.40-12.50	60 * (30)	B 10	10.60-11.19	100	B 10	10.60-11.19	100
						Band 11	11.50-12.51	100	B 11	11.50-12.51	100

Landsat 9 использует датчики OLI-2 и TIRS-2 для сбора данных в видимом, инфракрасном и TIR спектрах, обеспечивая возможности наблюдения Земли с высоким разрешением и мультиспектральностью. Проведенное исследование показывает, что Landsat 9

превосходит Landsat 8 в классификации видов водных объектов и растительности, что объясняется увеличением радиометрического разрешения с 12 бит (Landsat 8) до 14 бит, улучшенной чувствительностью к яркости и цвету и возможностью обнаружения едва заметных различий, особенно в более темных областях, таких как водоемы

ASTER (усовершенствованный космический радиометр отражения теплового излучения) стал надежной заменой снимкам TIR. ASTER включает подсистему видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, коротковолновый инфракрасный радиометр и радиометр TIR (табл. 2). Данные глобальной цифровой модели рельефа, полученные из пар стереоизображений ASTER, известных как ASTER GDEM (глобальная цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission Global), могут быть эффективно использованы для привязки полосы к местности, калибровки и расчетов затенения.

Табл. 2.

Спектральная информация и длина волны ASTER.

ASTER	Radiometer	Resolution (m)	Wavelength (μm)	Wave-Width (nm)	S/N
Band 1	VNIR	15	0.52–0.60	90	$\geq 140\%$
Band 2			0.63–0.69	60	$\geq 140\%$
Band 3			0.76–0.86	100	$\geq 140\%$
Band 4	SWIR	30	1.60–1.70	92	$\geq 140\%$
Band 5			2.145–2.185	35	$\geq 54\%$
Band 6			2.185–2.225	40	$\geq 54\%$
Band 7			2.235–2.285	47	$\geq 54\%$
Band 8			2.295–2.365	70	$\geq 70\%$
Band 9	TIR	90	2.360–2.430	68	$\geq 54\%$
Band 10			8.125–8.475	344	$\leq 0.3 \text{ K}$
Band 11			8.475–8.825	347	$\leq 0.3 \text{ K}$
Band 12			8.925–9.275	361	$\leq 0.3 \text{ K}$
Band 13			10.25–10.95	667	$\leq 0.3 \text{ K}$
Band 14			10.95–11.65	593	$\leq 0.3 \text{ K}$

ДЗ ASTER не хватает возможностей для удовлетворения требований мелкомасштабных исследований литологической классификации. Спутники серии Sentinel предоставляют надежные наборы данных для программы Copernicus, облегчая динамический мониторинг глобальной окружающей среды и безопасности в режиме реального времени. Спутниковая группировка Sentinel-2, состоящая из Sentinel-2A и Sentinel-2B, соответственно, предлагает ценную альтернативу для устранения этого ограничения. Sentinel-2 обеспечивает покрытие между широтами 56° южной широты и 84° северной широты с периодом повторения 5 дней на экваторе и шириной полосы 290 км

Преимущества Sentinel-2, такие как более высокое пространственное и спектральное разрешение, короткий период повторного просмотра, большее количество полос и открытый доступ к данным, делают его необходимым для классификации растительного покрова и составления литологических карт. Однако большой объем данных требует обширной обработки и хранения, предъявляя значительные требования к вычислительным ресурсам и ресурсам хранения (табл. 3).

Информация о спектре и длине волны Sentinel-2.

Sentinel-2	Band	Wavelength (nm)	Resolution (m)
Band 1	Aerosols	443.9 nm (S2A)/442.3 nm (S2B)	60
Band 2	Blue	496.6 nm (S2A)/492.1 nm (S2B)	10
Band 3	Green	560 nm (S2A)/559 nm (S2B)	10
Band 4	Red	664.5 nm (S2A)/665 nm (S2B)	10
Band 5	Red edge 1	703.9 nm (S2A)/703.8 nm (S2B)	20
Band 6	Red edge 2	740.2 nm (S2A)/739.1 nm (S2B)	20
Band 7	Red edge 3	782.5 nm (S2A)/779.7 nm (S2B)	20
Band 8	NIR	835.1 nm (S2A)/833 nm (S2B)	10
Band 8A	Red edge 4	864.8 nm (S2A)/864 nm (S2B)	20
Band 9	Water vapor	945 nm (S2A)/943.2 nm (S2B)	60
Band 10	Cirrus	1373.5 nm (S2A)/1376.9 nm (S2B)	60
Band 11	SWIR 1	1613.7 nm (S2A)/1610.4 nm (S2B)	20
Band 12	SWIR 2	2202.4 nm (S2A)/2185.7 nm (S2B)	20

WorldView-3 (WV-3 - коммерческий спутник высокого разрешения предоставляет исключительные данные изображений с выдающимся пространственным разрешением-0,31 м (31 см) в полосе панорамирования, 1,24 м в MC (включая синий, зеленый, красный и NIR) и 3,7 м в SWIR, WV-3 выделяется своими замечательными пространственными возможностями. Сочетание высокого спектрального и пространственного разрешения позволяет WV-3 превосходно составлять литологические карты, предоставляя точную и всестороннюю информацию о типах горных пород.

Гиперспектральные снимки предлагают такие преимущества, как высокое спектральное разрешение, многополосный охват, непрерывность спектра, возможность спектрального разделения и способность различать объекты. Они широко используются для литологической классификации в районах, покрытых растительностью, со спутниками, такими как EO-1, PRISMA, EnMAP, Hyperion и HypsIRI. Однако важно признать некоторые ограничения гиперспектральных снимков, включая ограниченную доступность данных и их охват, а также более низкое пространственное разрешение по сравнению с мультиспектральными снимками.

1.2. Радар с синтезированной апертурой.

Sentinel-1 (SAR) состоит из двух спутников S1A и S1B. S1 используют радиолокационные системы, работающие в С-диапазоне, что позволяет получать информацию о поверхности независимо от погодных условий, включая топографию, геоморфологию, почвенный покров и изменения поверхности. Примечательно, что они обеспечивают высокое разрешение (до 5 м), многополярность (VV, VH, HH и HV), множество режимов, широкий охват полосы и периоды частого пересмотра. Однако практическое применение требует рассмотрения проблем хранения и обработки данных. Кроме того, чувствительность данных SAR к «шероховатости поверхности» часто требует для интерпретации интеграции с другими источниками данных, такими как оптические изображения и данные о рельефе.

ALOS-PALSAR (Phased Array L-type band SAR), установленный на усовершенствованном спутнике наблюдения за сушей (ALOS) Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), представляет собой SAR-датчик с характеристиками литологического картирования,

сопоставимыми с Sentinel-1 (C-band). ALOS-PALSAR предоставляет радиолокационные снимки высокого разрешения и данные цифровой модели рельефа (DEM), которые используются для таких приложений, как классификация растительного покрова, измерение рельефа и обнаружение подземных целей. Работая в L-диапазоне, ALOS-PALSAR имеет двойную поляризацию (HH и HV), высокое разрешение (1 м), DEM и множество режимов. Сочетание его с оптическими РС и радиолокационными данными повышает точность и надежность литологической классификации.

Космический радиолокатор С-диапазона и прибор SAR X-диапазона на борту космического челнока используются для миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), картографического проекта, проводимого совместно НАСА и NGA. SRTM известна как одна из глобальных цифровых моделей рельефа с самым высоким разрешением, предлагающая всесторонний глобальный охват, высокое разрешение (от 30 до 90 м) и превосходное качество. Данные SRTM используются в исследованиях литологической идентификации, поскольку такие факторы, как уклон, отражают устойчивость горных пород к эрозии. Однако точность SRTM ниже в полярных и покрытых лесом регионах из-за характеристик датчиков SAR, что требует осторожности при его использовании в различных областях исследований.

Обнаружение света и определение дальности (ЛиДАР) - это активная технология RS, которая позволяет получать точные данные о местности с высоким разрешением. Эта технология предлагает потенциальное решение для преодоления неоднозначной идентификации поверхности по схемам густой растительности. Лазерные отражения от земли можно отличить от отражений растительности, что позволяет создавать точную DTM (цифровую модель местности). Способность идентифицировать тонкие топографические особенности в DTM с высоким разрешением делает ЛиДАР важным инструментом для идентификации литологии.

Спутниковые источники высокого разрешения из Китая серии Gaofen, Huanjing и Ziyuan предлагают пространственное разрешение в диапазоне от субметров до сотен метров. GF-1, GF-2, GF-3, GF-5, HJ-1A CCD, ZY-02D и ZY-3 (табл. 4) Среди них мультиспектральный сканер с загрузкой GF-1, GF-2, HJ-1A CCD и ZY-3, гиперспектральный сканер с загрузкой GF-5 и ZY-02D и SAR-камера с загрузкой GF-3.

Табл. 4.

Спутниковая информация GF-1, GF-2, GF-3, GF-5 и ZY-3, запущенных Китаем.

(SR для пространственного разрешения, R для повторного обзора, OA для высоты орбиты и LT для времени запуска).

Satellite	Band Range	SR (m)	R (Day)	Swath (km)	OA	LT
GF-1	blue, green, red, MIR	2/8	5	90/800	645 km	2013/4/26
GF-2	blue, green, red, NIR	0.8/2	3-5	45/16	645 km	2014/8/19
GF-3	X, S, C, L	1/3/8/25	1-4	30-40	755 km	2016/8/10
GF-5	VNIR, SWIR, MWIR	30	16	60	705 km	2018/5/9
HJ-1A CCD	VNIR	30		700		2008/9/6
ZY-1 02D	VNIR, SWIR	30	55	60	705 km	2019/9/12
ZY-3	full-color, multispectral	2.1/3.5/6	5/3	51/52	505 km	2012/1/9

Их высокое пространственное разрешение позволяет проводить точную мелкомасштабную литологическую классификацию. Однако крайне важно учитывать, что получение этих данных сопряжено с финансовыми затратами и у каждого спутника есть свои сильные стороны и ограничения. Например, GF-2 отличается высоким пространственным разрешением, несколькими спектральными полосами и периодами частого пересмотра, но у него есть ограничения с точки зрения охвата и относительно более низкого радиометрического разрешения, что может ограничить некоторые приложения для мелкомасштабного анализа. И наоборот, GF-3 предлагает такие преимущества, как несколько режимов поляризации и периоды частого пересмотра, но он имеет более низкое пространственное разрешение и ограниченное количество спектральных полос.

2. Методы.

2.1. Извлечение признаков.

Выделение признаков имеет решающее значение для классификации и распознавания изображений. Оно преобразует необработанные пиксельные данные в векторы отличительных признаков, раскрывая значимые взаимосвязи и закономерности для повышения производительности.

Спектральные характеристики.

Отражающие свойства, извлеченные из различных диапазонов оптических изображений (VNIR, SWIR и TIR), и обратное рассеяние, полученное из данных радара (С, L и X-диапазоны), играют решающую роль в составлении карт литологии в регионах, покрытых растительностью. Оптические диапазоны, такие как VNIR и SWIR, предоставляют ценную информацию для идентификации горных пород на основе цвета, коэффициента отражения и поглощения. Кроме того, эти данные помогают инвертировать температуру поверхности, выявляя тепловые характеристики и подповерхностные воздействия. Параметры, связанные с температурой, такие как TVDI и другие термические характеристики, могут количественно оценивать свойства горных пород. С другой стороны, радарные диапазоны, такие как X-диапазон, позволяют получить представление о морфологии и структуре поверхности за счет поверхностного и объемного рассеяния, в то время как С-диапазон проникает сквозь растительность и слой почвы, предоставляя информацию о морфологии и структуре горных пород. Более длинные волны L-диапазона обеспечивают более глубокое проникновение, облегчая анализ эхо-сигнала для классификации литологии и геологического структурного анализа. Однако характеристики отклика в L-диапазоне могут проявлять сложность и перекрываться среди различных типов литологии.

Понимание взаимосвязи между характеристиками отражения и литологией помогает понять влияние литологии на наземные растительные сообщества двумя ключевыми способами: обеспечение растений питательными веществами для роста и влияние на потенциал накопления воды через изменение глубины выветривания и пористости. Различия в типах горных пород в разных регионах со схожим климатом способствуют формированию разнообразных растительных сообществ. Индексы растительности, используемые при составлении литологических карт, включают: нормализованной разницы (NDVI), индекс «зелености», коротковолновой инфракрасной растительности (VIGS) и коротковолновый инфракрасный нормализованный индекс (SWVI). NDVI показывает растительный покров, VIGS определяет стресс растительности от элементов с тяжелыми металлами, а SWVI отражает содержание влаги в листьях растений.

Коэффициент «полосности» (BR) широко используется в литологической классификации для дифференциации различных типов горных пород путем извлечения различной геологической информации с помощью различных комбинаций полос. Например, Landsat TM с соотношением полос 5/4 чувствителен к изменениям в минералах железа, в то время как соотношение полос 3/1 чувствительно к изменениям в трехвалентном железе, что помогает в определении характеристик гетита. Соотношение полос 4/3 очень чувствительно к плотности растительности, но менее чувствительно к литологическим изменениям, что делает его пригодным для определения границ растительности. Соотношение полос 5/7 обычно меняется в зависимости от обилия гидроксилсодержащих минералов, карбонатов и др.

Топографические и геоморфологические особенности.

На топографию и геоморфологию влияют такие факторы, как литология, структура и внешняя динамика, и они дают ценную информацию о вариациях эрозии и выветривания в различных литологических районах, которые могут быть использованы для составления литологических карт. Обычно используются несколько общих топографических характеристик, включая высоту, наклон, аспект, индекс топографического положения (TPI), «шероховатость» поверхности (SR), интеграл по высоте (HI) и индекс поверхности (SI).

Наклон и SR указывают на фрагментацию ландшафта, причем карстовые регионы обычно демонстрируют более высокую степень фрагментации по сравнению с некарстовыми регионами. TPI играет решающую роль в литологической идентификации, извлекая особенности рельефа и смягчая топографические эффекты, тем самым облегчая распознавание типов горных пород. Значительные изменения наклона отражают различную устойчивость к эрозии различных литологий. Более того, SR характеризует деформацию поверхности. SI сочетается с HI для определения «гладкости» поверхности и SR для определения разреза

поверхности, обеспечивая всестороннюю характеристику состояния сохранности и эрозии в ландшафте (рис. 1а).

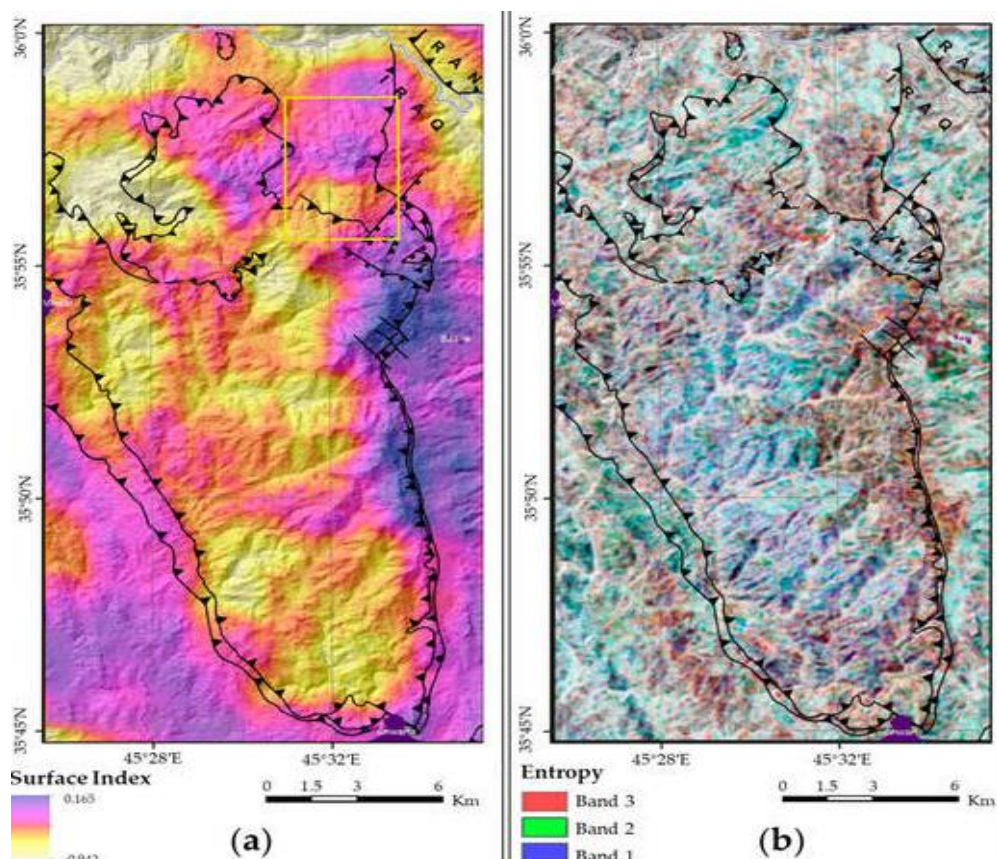


Рис. 1. Карта SI перекрытия надвигающихся разломов (а); (б) энтропия трех текстурных полос для измерения энтропии (на полосах 1, 2 и 3, т. е. NIR, красная и зеленая полосы от ASTER)

Важно отметить, что расчет энтропии следует за созданием текстурных элементов для каждой полосы с использованием матрицы совместного залегания серого уровня.

Особенности текстуры.

Особенности текстуры играют решающую роль в отражении пространственного распределения и организационной структуры поверхностных объектов, а также их взаимосвязи с окружающей средой. Эти функции предоставляют ценную информацию для классификации растительности, картографирования растительного покрова и идентификации горных пород. В районах, покрытых растительностью, общие характеристики текстуры, полученные из матриц совместного залегания серого уровня, включают среднее значение, дисперсию, однородность, контраст, несходство, энтропию, и корреляцию. Каждый из этих признаков служит определенной цели при характеристике текстуры изображения. Контраст, например, служит индикатором линейной взаимосвязи между соседними пикселями, выявляя различия в интенсивности или значениях цвета. Однородность отражает однородность или сходство соседних пикселей в диапазоне от 0 до 1. Энтропия количественно определяет степень пространственного беспорядка с более высокими значениями, указывая на большую

случайность в распределении пикселей. Энергия отражает равномерность распределения серого и выделяет мелкие детали в текстуре (рис. 1b).

Примечательно, что наблюдалась отчетливая переходная зона протяженностью около 200 км в прибрежной зоне Северной Калифорнии. Эта зона действует как граница, отделяющая широколиственно-хвойные вечнозеленые смешанные леса от дубовых саванн, и она соответствует геологическим границам, изображенным на карте. Это наблюдение предполагает взаимосвязь между особенностями текстуры, полученными на изображении, и лежащими в основе литологическими характеристиками, которые влияют на структуру растительности.

Морфологический признак спектральной кривой.

В районах, покрытых растительностью, точное разграничение различных горных пород с использованием традиционных методов выделения спектральных признаков может быть сложной задачей из-за значительного спектрального перекрытия, вызванного растительностью. Однако, анализируя морфологию спектральной кривой и учитывая такие характеристики, как глубина полосы поглощения, положение, ширина, наклон и положение пика, становится возможным различать различные материалы горных пород. Например, породы, содержащие железные минералы, демонстрируют выраженные полосы поглощения в коротковолновой инфракрасной области (SWIR) (2000-2500 нм), в то время как породы с алюминиевыми минералами демонстрируют сильную отражательную способность в видимой и ближней инфракрасной областях (NIR) (700-900 нм).

Уменьшение размерности для извлечения признаков.

Методы уменьшения размерности для выделения признаков играют решающую роль в анализе Д ДЗ. Для этой цели могут быть использованы такие методы, как анализ главных компонент (PCA), минимальная доля шума (MNF), дискретное вейвлет-преобразование (DWT) и алгоритмы глубокого обучения (DLAS). За счет уменьшения размерности эти методы эффективно устраняют избыточную или нерелевантную информацию, что приводит к повышению эффективности вычислений и ускорению анализа. Кроме того, эти методы позволяют извлекать ценную информацию из необработанных изображений, включая границы объектов, особенности текстуры и спектральные характеристики. Эта извлеченная информация очень полезна для задач литологической классификации и идентификации.

2.2. Методы классификации.

Различные методы подходят для разных типов данных и задач, требуя тщательного рассмотрения характеристик данных и требований к классификации. Обычно используемые алгоритмы для литологической идентификации включают SMA, SVM, RF, DL и объектно-ориентированный анализ изображений (OBIA). Также возможны другие методы, такие как

MLC, LDA, частичный анализ дискриминации по методу наименьших квадратов (PLSDA), SAM, SFF, самоорганизующаяся карта Кохонена (SOM) и ближайшее расстояние. Однако из-за ограничений на «затенение» обнажений коренных пород, ограничений спектральной библиотеки и спектральной смеси применение этих методов может быть ограниченной. Например, LDA чувствителен к шуму и не обладает возможностями нелинейной классификации, в то время как PLSDA чувствителен к выбросам, склонен к переоснащению и требует значительных данных для обучения. В этом контексте необходимо сосредоточиться на внедрении SMA, SVM, RF, DL и OBIA в качестве жизнеспособных вариантов составления литологических карт в районах, покрытых растительностью.

Анализ спектрального смешения (SMA).

Спектральное разделение предполагает, что спектральная отражательная способность каждого пикселя представляет собой комбинацию значений яркости конечного элемента, представляющих конкретные материалы с постоянными спектральными характеристиками. Обилие этих конечных элементов определяет распределение общей площади поверхности в пикселях. Яркость каждого конечного элемента прямо пропорциональна его обилию, что приводит к линейному процессу спектрального смешения. Эта взаимосвязь между спектральной отражательной способностью пикселя, сиянием конечного элемента и обилием математически описывается уравнением:

$$Ref_{pixe} = \sum_{i=1}^m f_i DN_i \quad (1)$$

В уравнении (1) Ref представляет значение коэффициента отражения пикселя, m обозначает количество конечных элементов, f_i представляет обилие каждого конечного элемента (т.е. соотношение площадей конечных элементов с $\sum_{i=1}^m f_i=1$), и DN_i представляет значение диапазона для каждого конечного элемента.

SMA - ценный метод для количественного анализа и классификации смешанных пикселей на изображениях ДЗ, облегчающий литологическую классификацию в районах, покрытых растительностью. Гиперспектральные или мультиспектральные данные необходимы для получения всеобъемлющей спектральной информации. Перед анализом следует провести предварительную обработку и фильтрацию шума, чтобы повысить качество данных и уменьшить шумовые помехи. Важно учитывать такие факторы, как размер пикселя, нелинейность, отсутствие однородности внутри пикселей и спектральное перекрытие между различными литологиями, поскольку они могут повлиять на результаты анализа. Выбор подходящего размера пикселя на основе конкретных обстоятельств имеет решающее значение. Примечательно, что была достигнута впечатляющая точность в 85% при определении геолого-фациальной и литологической классификации пород, перекрытых лесом,

в бассейне реки Моги-Гуасу, Бразилия, путем интеграции съемок растительности, анализа образцов донных отложений, самоорганизующихся карт и спектрального анализа без смещения. Аналогично, была достигнута литологическая классификация с точностью, превышающей 80% в разнородных геологических регионах, с использованием нескольких источников данных ДЗ, таких как Hyperion, ASTER и Landsat 8-OLI, наряду со спектральным анализом без смещения.

Машина опорных векторов (SVM).

SVM - это метод классификации, который находит гиперплоскость для разделения различных классов образцов, максимизируя разницу между ними. Оно превосходно справляется с задачами нелинейной классификации, используя функцию ядра для отображения данных в многомерном пространстве. SVM минимизирует эмпирические и структурные ошибки путем обобщения ограниченных учебных данных для достижения классификации. Этот метод хорошо работает при обработке многомерных данных и эффективен при решении задач нелинейной классификации. Оно широко рекомендуется для решения сложных задач классификации при многоспектральном и гиперспектральном анализе данных.

SVM в сочетании с данными ДЗ успешно выполнили литологическую классификацию в различных регионах. Например, используя спутниковые данные ASTER для определения особенностей рельефа, текстуры и мультиспектральной информации, офиолитовый комплекс Мават в Иракском регионе Курдистан был классифицирован с общей точностью 80,5%. В районе Сук-Арба Сахель в Марокко данные Landsat OLI и SVM позволили получить высокую точность классификации - 85%. SVM в сочетании с данными Sentinel-1, ALOS PALSAR, Landsat OLI, ASTER и ALI достигли точности классификации, превышающей 85% в регионах с густой растительностью на юге Туниса. В округе Дуолунь, Автономный район Внутренняя Монголия, Китай, данные RS GF-2, Sentinel-2A, ASTER и GF-3, наряду с классификатором SVM на основе оптимизации роя частиц (PSO), позволили получить точность литологической классификации в 90,90%.

Однако SVM сталкивается с проблемами при обработке крупномасштабных данных, включая длительное время подготовки и чувствительность к шуму и выбросам. Кроме того, выбор подходящих параметров для SVM может быть затруднен, а интерпретируемость результатов может быть ограниченной, что затрудняет понимание процесса принятия решений классификатором.

Случайный лес (RF).

RF - это алгоритм коллективного обучения. Он одновременно создает множество деревьев решений для достижения классификации, демонстрируя сильную способность к

обобщению, высокую вычислительную эффективность и хорошую надежность. При литологической классификации RF продемонстрировал хорошую точность и вычислительную эффективность. Например, использовали спутниковые данные Sentinel-1 и метод 2D DWT для классификации шести типов горных пород в регионе западный Тяньшань в Китае. Была достигнута точность 85,5%, используя алгоритм RF. Аналогичным образом, использовали несколько источников данных ДЗ и различные характеристики для автоматической классификации четвертичных образований в регионе Вьет Чи во Вьетнаме, достигнув точности классификации 80,99% с использованием RF-алгоритма.

Стоит отметить, что RF сильно зависит от количества и распределения проб, а параметр максимальной глубины существенно влияет на ошибку. RF чувствителен к шуму и выбросам, и в случае несбалансированных данных может потребоваться повторная выборка или корректировка весов классов. Кроме того, RF может столкнуться с трудностями при подборе и прогнозировании данных со скрытыми взаимосвязями и сложными закономерностями.

Глубокое обучение (DL).

DL, передовая ветвь MLAs, преодолевает ограничения традиционных алгоритмов, которые фокусируются исключительно на классификации на уровне пикселей и пренебрегают пространственными особенностями. В контексте районов, покрытых растительностью, были широко изучены DLA, такие как многослойный перцептрон (MLP) и сверточные нейронные сети (CNN) для составления литологических карт. MLP, многоуровневая нейронная сеть прямой связи, превосходно улавливает нелинейные взаимосвязи и автоматически изучает особенности, что делает ее подходящей для задач классификации и регрессии. С другой стороны, CNN с ее иерархической структурой, включающей «сверточные», объединенные и полностью связанные слои, превосходна в выделении объектов и классификации изображений. По сравнению с традиционными MLA, CNN может автоматически изучать представления объектов более высокого уровня и демонстрировать сильные возможности распознавания образов и обобщения. Более того, CNN позволяет проводить комплексное обучение, устраняя необходимость ручного выделения объектов.

Эти преимущества привели к широкому внедрению DLA для литологической идентификации в регионах, покрытых растительностью. Например, были использованы снимки MLP и Landsat для классификации литологии в густо поросших лесом районах южного Камеруна, достигнув точности классификации 53,01%. Аналогичным образом объединили данные Sentinel-2 и ASTER с моделью U-Net для классификации литологии в районе Маунт-Пейнтер в Австралии, достигнув точности классификации в 75%. Был использован CNN с изображениями ДЗ и данными геохимической съемки для геологического картирования в Цзилинь Баолиге, Внутренняя Монголия, Китай. Модель CNN достигла

точности 83,0%, превосходя модель случайного леса и эффективно устраняя “феномен соли и перца” в традиционных неглубоких озерах. Кроме того, был использован тепловизионный аэрофотосниматель (TASI) и 3D CNN для классификации литологии в трех местах в Лююане, провинция Ганьсу, Китай, достигнув высочайшей точности в 98,56%.

Однако DLA имеют такие проблемы, как потребность в большом объеме данных и вычислительных ресурсах, что приводит к увеличению времени обучения и более высокому риску переобучения. Для смягчения этих проблем часто требуются методы регуляризации. Кроме того, DLA имеют сложную структуру, которая требует тщательной настройки параметров и оптимизации для достижения оптимальной производительности. Более того, DLA, как правило, не поддаются интерпретации, что затрудняет полное понимание их внутренней работы.

Анализ изображений на основе объектов (OBIA).

Методы классификации изображений на основе пикселей имеют ограничения, поскольку они игнорируют пространственную корреляцию между пикселями изображения, что приводит к явлению “соли и перца” на результирующих классификационных картах. OBIA появился как альтернативный подход, рассматривающий отдельные объекты и учитывающий такие характеристики, как форма, размер и текстура, для более точной идентификации и классификации элементов поверхности.

3. Составление литологическое карт в районах с плотной растительностью.

3.1. Выбор источника данных и его влияние.

Источники ДДЗ.

Мультиспектральные данные предлагают значительные преимущества для литологической классификации, включая исчерпывающую спектральную информацию, более высокое пространственное разрешение, разнообразные методы выделения признаков и разнообразные варианты сочетания полос. Однако отбор данных должен соответствовать конкретным задачам исследования. Более низкое пространственное разрешение может снизить точность классификации и сохранение деталей. Более высокое пространственное разрешение обеспечивает подробную информацию о растительности и поверхности, способствуя литологическому различию. Однако увеличение пространственного разрешения может привести к возникновению проблем со смешанными пикселями и шумом в данных, что может привести к снижению точности классификации. По мере увеличения разрешения уменьшение площади пикселя приводит к усложнению границ объекта и увеличению количества встречаемости смешанных пикселей. Кроме того, пиксели, которые не были отнесены к определенному классу, классифицируются только тогда, когда вероятность их

принадлежности к определенному классу превышает вероятность альтернативных классов. Тем не менее, по мере дальнейшего увеличения разрешения уменьшающаяся площадь пикселя и тонкие различия между объектами усиливают проблемы, связанные с шумом данных, что в конечном итоге влияет на точность классификации. Более того, мультиспектральные данные предлагают более широкий спектр информации, но более низкое спектральное разрешение между полосами, что может привести к спектральному перекрытию и трудностям в различении различных литологических особенностей.

Гиперспектральные данные особенно подходят для алгоритмов SMA и advanced ML, поскольку они обеспечивают более высокое спектральное разрешение, позволяя более точно выявлять характеристики горных пород и минералов в более тонких спектральных диапазонах. Нуregion демонстрирует самую высокую точность (0,92) в литологической классификации по сравнению с ASTER и Landsat 8 (табл. 5). Однако гиперспектральные данные сопряжены с проблемами больших объемов, сложной обработки, шума и ошибок. Поверхностные покрытия, такие как растительность, водные объекты и облака, влияют на сбор и анализ данных, влияя на точность литологической классификации.

Табл. 5.

Средняя общая точность (%) перекрестной проверки для оценки точности классификации.

“Предлагаемый” представляет собой ансамблевый метод, основанный на взвешенном объединении.

Classifier	Hyperion	ASTER	Landsat 8	Combined
MD	49.02	66.82	63.55	
SAM	71.24	45.21	47.16	
SID	66.43	42.38	48.22	
SVM	87.03	64.89	60.79	
MAXW	71.98	54.21	60.78	70.80
Proposed	91.93	75.90	67.16	93.22

Радиолокационные данные, способные проникать сквозь облака и поверхностную растительность, предоставляют информацию о коренных породах, что делает их выгодными для районов с густой растительностью или регионов с менее заметными поверхностными литологическими особенностями. Используя Sentinel-1 с пространственным разрешением 10 м и дискретным вейвлет-преобразованием, была достигнута точность литологического картирования 55,6%. Однако данные SAR имеют более низкое пространственное разрешение и не содержат информации о цвете по сравнению с оптическими ДЗ, что создает проблемы с детализацией и менее точной идентификацией и классификацией горных пород. Для всестороннего анализа часто необходима интеграция с другими источниками данных.

Предварительная обработка и интеграция данных.

Предварительная обработка данных ДЗ включает в себя различные этапы, такие как радиометрическая коррекция, атмосферная коррекция, геометрическая коррекция, регистрация данных, обрезка данных, повторная выборка, фильтрация данных и объединение данных. Гиперспектральные данные требуют более совершенных методов предварительной

обработки, чем мультиспектральные данные, из-за более высокого спектрального разрешения и большего объема данных. Эти методы направлены на уменьшение размера данных, устранение шума и ошибок и корректировку эффектов спектрального смещения. Напротив, методы предварительной обработки мультиспектральных данных относительно проще, обычно они включают базовые процедуры калибровки и шумоподавления.

Интеграция данных повышает точность классификации геологических параметров за счет объединения дополнительной информации. Предлагаются различные подходы к объединению данных:

(1) *Интеграция различных многоспектральных данных*: объединение различных источников для повышения пространственного разрешения и более точного представления особенностей поверхности;

(2) *Мультиспектральные снимки ДЗ и данные о рельефе*: это объединение позволяет лучше выделить особенности, необходимые для литологической классификации, включая цвет, текстуру и морфологию поверхности (рис. 2);

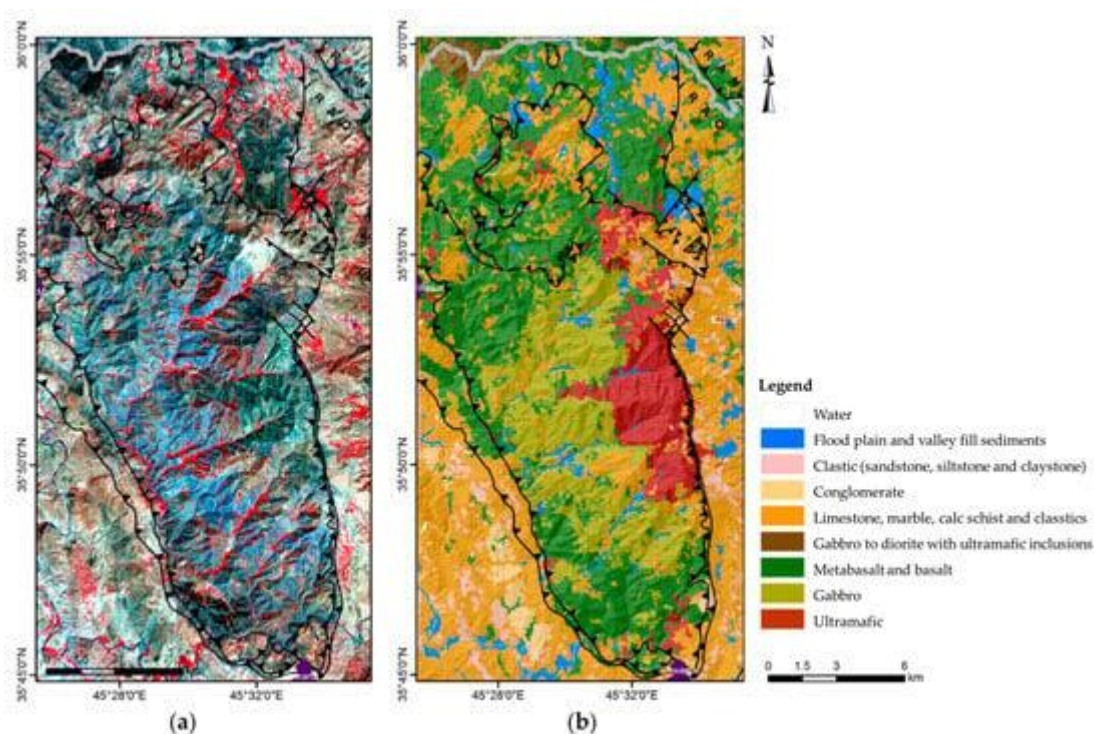


Рис. 2. (a) Наложение данных ASTER по надвигающимся разломам (b) выделило классы из комбинированных данных, полученных на основе ASTER и DEM.

(3) *Мультиспектральные данные и аэрогеофизические данные*: эта интеграция обеспечивает исчерпывающую геологическую информацию, повышая точность и уровень детализации при литологическом картировании;

(4) *Мультиспектральные РС-снимки и данные геохимической съемки*: объединение типов поверхностного покрова, индексов растительности, литологии и информации о минеральном составе для улучшения литологической классификации (рис. 3);

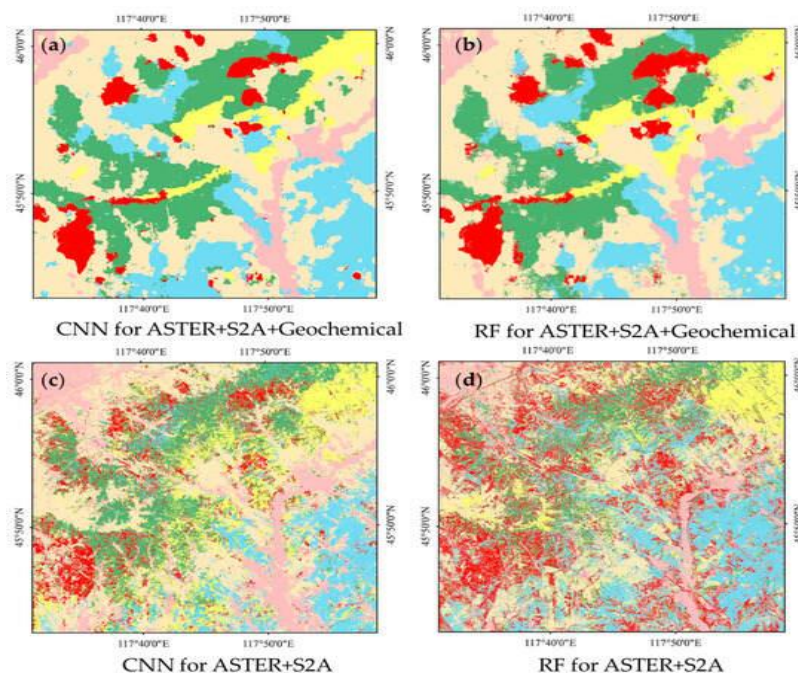


Рис. 3. Классификационная карта, полученная (a) CNN на основе fused ASTER, Sentinel-2A (S2A) и данных геохимической съемки, (b) RF на основе fused ASTER, RF и данных геохимической съемки, (c) CNN на основе ASTER и S 2A и (d) RF на основе ASTER и S 2A.

(5) *Гиперспектральные и мультиспектральные снимки*: этот метод улучшает пространственное и спектральное разрешение, уменьшает шум и ошибки, тем самым повышая точность и надежность литологической идентификации (табл. 5);

(6) *Гиперспектральные РС и данные о рельефе*: интеграция этих наборов данных повышает способность обнаружения наземных объектов, особенно в районах со сложным рельефом и густым растительным покровом;

(7) *SAR и данные о рельефе*: этот объединенный подход обеспечивает всестороннее описание рельефа и особенностей подповерхностных слоев, что приводит к повышению точности литологической классификации.

При проведении обработки данных с объединением крайне важно учитывать такие проблемы, как несогласованность данных (различные системы координат, разрешения и спектральные диапазоны), большой объем данных и сложные задачи обработки данных (предварительная обработка данных, извлечение признаков и регистрация данных).

3.2. Сравнительный анализ различных методов выделения признаков.

Анализ для уменьшения размерности при извлечении признаков.

Сравнение различных методов выделения признаков, включая PCA, MNF, DWT и DLA, требует тщательного рассмотрения их соответствующих сильных сторон и ограничений.

Анализ главных компонент (PCA) фокусируется на линейных преобразованиях и идентифицирует ортогональные компоненты, которые фиксируют максимальную дисперсию в данных, уменьшая размерность при сохранении важной информации. Однако оно чувствительно к распределению данных и применимо только к линейным зависимостям.

Минимальная доля шума (MNF) предназначена для обработки шума и упорядочивает компоненты на основе их шумового содержания, повышая интерпретируемость изображений ДЗ за счет выделения значимых компонентов. В отличие от PCA, результирующие компоненты преобразования MNF могут быть не ортогональными, что подразумевает потенциальные корреляции между преобразованными осями.

Дискретное вейвлет-преобразование (DWT) в литологической классификации обеспечивает выделение высокочастотных и низкочастотных компонентов, повышая плавность классификации и определение границ. Тем не менее, оно имеет ограничения в воздействии на высокочастотные компоненты образцов небольшого размера и требует дальнейшей проверки для составления карт регионов большего масштаба.

Алгоритмы глубокого обучения (DLA) отличаются автоматическим изучением объектов, высокоуровневым извлечением информации, надежностью и масштабируемостью. Однако для этого требуются значительные данные, вычислительные ресурсы и маркированные данные, при этом они не поддаются интерпретации и подвержены переосмыслению. Поэтому при выборе подходящего метода важно тщательно учитывать контекст приложения и характеристики данных.

Оценка эффективности и сравнение методов выделения признаков.

Сравнительный анализ различных наборов данных ДЗ позволил получить ценную информацию об их соответствующих сильных сторонах и преимуществах. Например, ASTER продемонстрировал превосходную производительность в литологической идентификации по сравнению с Sentinel-2, в первую очередь благодаря своим шести полосам, в то время как Sentinel-2 преуспел в составлении карт железосодержащих минералов, продемонстрировав сильные стороны каждого набора данных. Кроме того, Landsat 8 продемонстрировал лучшую производительность в различении литологических единиц по сравнению с Landsat 7 благодаря своему более широкому спектральному диапазону. Однако Landsat 7 продемонстрировал превосходные возможности в различении водных и глинистых минералов с использованием определенных полос, подчеркнув уникальные преимущества каждого набора данных. Кроме того, при сравнении наборов данных ASTER, OLI/Landsat 8 и WorldView-3 WorldView-3 достиг более высокой точности - 87%. Это можно отнести к полосам SWIR WorldView-3, которые содержат больше диагностических характеристик поглощения в сочетании с высоким пространственным разрешением, предоставляя более подробную информацию для литологической классификации.

Сравнительный анализ результатов классификации показал, что сочетание многоспектральной отражательной способности, особенностей рельефа и PCA с алгоритмом SVM дает наилучшие результаты классификации (табл. 6, рис. 4).

Результаты классификации MLC и SOM.

Variable	MLC		SOM	
	OA (%)	Каппа	OA (%)	Каппа
ATM 9	61.6	0.50	60.3	0.48
ATM PCA	51.4	0.37	50.2	0.35
ATM MNF	59.3	0.46	65.5	0.54
ATM-Li	61.9	0.50	70.2	0.60
ATM-Li MNF	60.8	0.49	72.7	0.63

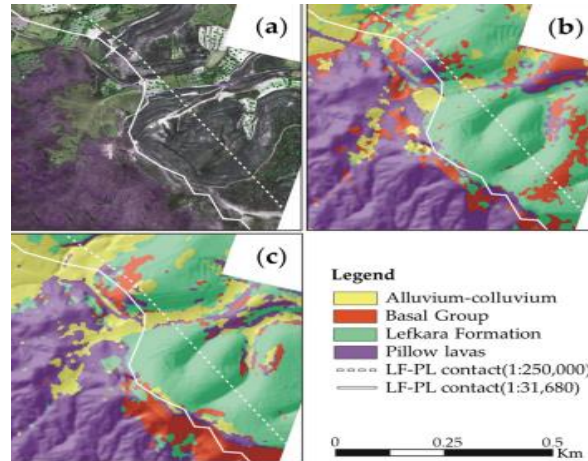


Рис. 4. (a) Изображение QuickBird. Литологические карты: (b) спектрального алгоритма (ATM MNF SOM), (c) интегрированного спектрально-топографического алгоритма (ATM-Li MNF SOM).

Аналогичным образом, объединение характеристик R, BR, TPI, PCA и XY с использованием RF-алгоритма привело к высочайшей точности классификации в 79,66% и коэффициенту Каппа 0,75. Примечательно, что использование только признаков R и XY позволило достичь удовлетворительной точности классификации в 74% и коэффициента Каппа 0,68. Добавление любого дополнительного признака, основанного на этих двух, немного улучшило результаты классификации или оказало минимальное влияние на них. Однако введение двух дополнительных характерных переменных привело к значительному снижению точности классификации с общим снижением от 8% до 10%, сопровождающимся снижением коэффициента Каппа от 0,09 до 0,13 (рис. 5).

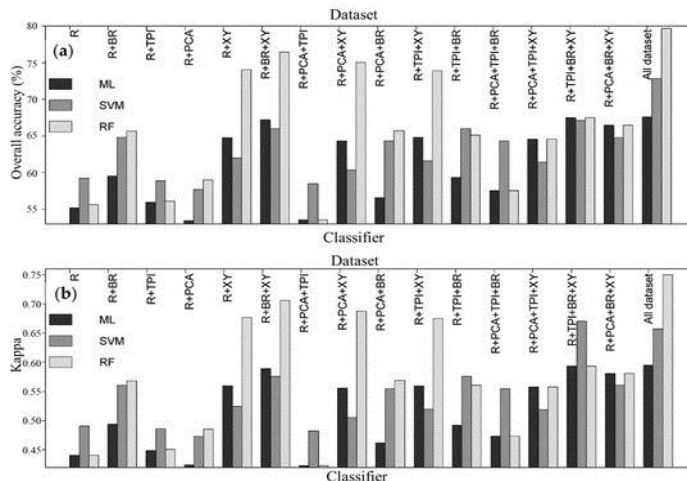


Рис. 5. Общая точность (a) и каппа (b) для различных комбинаций объектов методами ML, SVM и RF. (R обозначает коэффициент отражения, BR обозначает коэффициент полосности, TPI представляет индекс топографического положения, PCA обозначает анализ главных компонент, а XY обозначает пространственные особенности).

Более того, интеграция спектральных, текстурных, рельефных и термических характеристик при исключении особенностей растительности может привести к оптимальной производительности литологической классификации с общей точностью 80,99% (рис. 6).

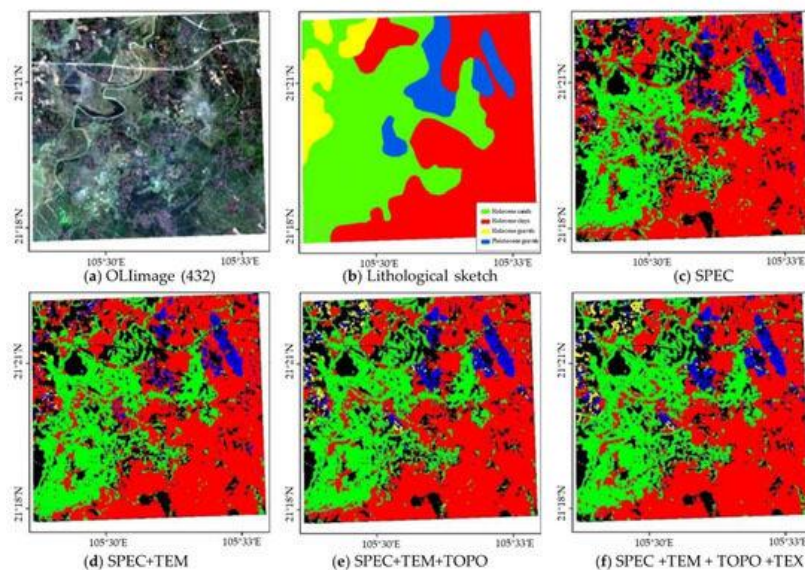


Рис. 6. (а) изображение OLI и (б) литологический набросок исследуемой территории, а также результаты литологической классификации территории на основе (с) спектрального (SPEC), (д) спекулярного спектра и термического (ТЕМ), (е) спекулярного спектра, ТЕМ и топографического (ТОПО) и (ф) спекулярного спектра, ТЕМ, ТОПО и текстурного (ТЕКСТ)

Были использованы методы обработки изображений, включая комбинацию полос, PCA, MNF и SAM, для создания подробных карт поверхностного распределения минералов оксида железа, минералов силиката железа, глинистых минералов и карбонатных минералов. Эти примеры подчеркивают важность отбора и извлечения объектов при составлении литологических карт, подчеркивая необходимость учета конкретных характеристик и преимуществ различных наборов данных и признаков для получения точных и надежных результатов классификации.

3.3. Выбор и применение методов классификации.

Самоорганизующаяся карта (SOM) представляет собой неконтролируемую модель обучения, использующую искусственные нейронные сети. Оно включает в себя непараметрические, помехоустойчивые возможности и возможности изучения структуры, что приводит к значительному повышению точности литологической классификации. В контексте подробного литологического составления карт офиолита Троодос на Кипре SOM продемонстрировал исключительную производительность, превзойдя MLC и достигнув наилучших результатов классификации с общей точностью 72,7% и Карра 0,63. RF превзошел ML и SVM с точки зрения общей точности, достигнув показателя точности 79,66% в предоставленном наборе данных. Кроме того, модель CNN превзошла RF в классификации литологических единиц, что привело к повышению общей точности на 5%. Примечательно, что модель CNN продемонстрировала благоприятные показатели в литологической

классификации на трех небольших участках в Лююане, провинция Ганьсу, Китай, превосходя классические методы машинного обучения и нейронные сети. Среди различных архитектур CNN 3D CNN достигла наивысшей точности классификации (рис. 7, табл. 7).

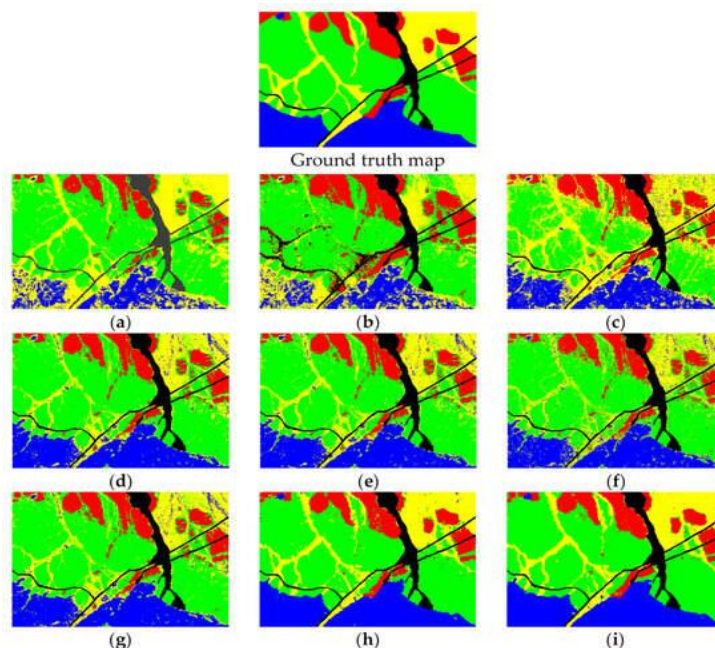


Рис. 7. Классификации с использованием (a) SAM, (b) SID, (c) линейного спектрального смещения с полным ограничением (FCLSU), (d) SVM, (e) RF, (f) NN, (g) 1-D CNN, (h) 2-D CNN и (i) 3-D CNN.

Табл. 7.

Классификации всех методов:
(a) SAM; (b) SID; (c) FCLSU; (d) SVM; (e) RF; (f) NN; (g) 1-D CNN; (h) 2-D CNN; (i) 3-D CNN.

	SAM	SID	FCLSU	SVM	RF	NN	1D CNN	2D CNN	3D CNN
OA	75.87	72.12	73.42	84.68	86.01	81.27	84.38	94.18	94.70
Каппа	0.64	0.59	0.63	0.77	0.79	0.78	0.77	0.91	0.92

Был использован OBIA с воздушными мультиспектральными и лидарными данными для косвенного составления карт литологии, используя связи между рельефом и типами растительности. Они достигли общей точности 73,5%, что повысило точность классификации на 13,1% по сравнению с методами, основанными на пикселях. Однако эффективность этого косвенного подхода может быть ограничена в более крупных или неоднородных ландшафтах. В другом исследовании использовали OBIA с изображениями WorldView-3 VNIR для составления литологических карт на острове Ормуз, южный Иран. Они достигли общей точности в 86,54%, что повысило точность на 19,33% по сравнению с классификацией на основе пикселей. Эти результаты демонстрируют потенциал OBIA в повышении точности и надежности задач составления литологических карт.

Комплексные классификаторы и интеграция гибридных моделей предлагают улучшенное решение задач литологической классификации. SVM продемонстрировала лучшие результаты классификации по сравнению с MD, SAM и SID. Однако предложенный метод составления ансамблевых карт на основе взвешенного объединения превзошел метод, основанный на

голосовании большинством голосов (MAXW), который основан на комбинации нескольких классификаторов, при этом результат классификации каждого пикселя определяется классом, получившим наибольшее количество голосов. Это усовершенствование привело к значительному увеличению точности классификации на 22,42%. Гибридные VSM и SVM могут эффективно подавлять информацию о растительности и обеспечивать прямую классификацию литологии.

4. Обсуждение и будущие возможности.

Несмотря на значительные усилия по интеграции методов дистанционного зондирования в литологическое картирование, достигнутая точность классификации по-прежнему не соответствует ожидаемым уровням. Удивительно передовые технологии, такие как оптические спутники высокого разрешения, InSAR, наземные SAR, бортовой лидар и воздушная геофизика, недостаточно используются в области литологического составления карт в районах, покрытых растительностью. Разработка классификационных моделей для составления литологических карт в различных регионах все еще находится на ранних стадиях, особенно в районах с густым растительным покровом, где необходимы дальнейшие усовершенствования в методах составления литологических карт.

Интеграция передовых методов.

Используя передовые методы ДЗ, такие как гиперспектральная визуализация, лидар и многовременный анализ данных, можно значительно повысить точность и надежность литологической идентификации в районах, покрытых растительностью. Кроме того, изучение потенциальной синергии между различными источниками данных и внедрение инновационных методов объединения данных может способствовать улучшению результатов классификации.

Улучшенное извлечение и отбор признаков.

При проведении исследований по составлению литологических карт в районах с высокой растительностью многократное объединение данных позволяет получить значительный объем данных. Прогресс в методах извлечения и отбора признаков улучшает идентификацию литологических особенностей в районах, покрытых растительностью. Модель взвешенного случайного леса на основе (GIWRF) учитывает несбалансированные выборки и повышает точность выбора объектов за счет учета показателя примеси Джини и присвоения пробам весов. Случайный лес (RF) широко используется для оценки важности объектов, предлагая высокую точность, пригодность для данных большого размера и надежность. Однако RF может демонстрировать предвзятость и не подходит для объектов с высокой степенью корреляции. Для уменьшения размерности объектов при одновременном рассмотрении

корреляции данных был предложен гибридный метод отбора объектов с использованием многослойной сети персептронов (MLP) для много классовых сетевых аномалий. Этот метод использует возможности сети MLP для захвата сложных взаимосвязей объектов и эффективного уменьшения размерности пространства объектов, улучшая общую производительность модели классификации.

Разработка гибридных классификационных подходов.

Интеграция нескольких методов классификации, включая объектно-ориентированный и пиксельный подходы, методы коллективного обучения и интеграцию гибридных моделей, потенциально может повысить точность классификации в районах, покрытых растительностью. Будущие исследования могут быть сосредоточены на изучении оптимальных стратегий слияния и разработке гибридных систем классификации, адаптированных к конкретным областям исследований. Показано, что комбинация пиксельного и объектного подходов позволяет создавать более точные карты классификации растительного покрова по сравнению с использованием каждого метода в отдельности. Кроме того, модели гибридных сверточных нейронных сетей (CNN), включающие как 2D, так и 3D-архитектуры CNN, наряду с различиями в размерах ядер, пакетной нормализации (BN) и слоях отсева, могут эффективно смягчать проблемы, связанные с переоснащением модели.

Разведка DLA.

DLA являются важным подходом к классификации изображений из-за их способности извлекать эффективные особенности, демонстрировать мощные возможности классификации, обрабатывать сложные сцены, снижать требования к данным и демонстрировать высокую масштабируемость. Однако в конкретном контексте классификации литологии в районах, покрытых растительностью, DLA в основном сосредоточены на классификации изображений с помощью относительно простых алгоритмических конструкций. Например, использование сверточных нейронных сетей (CNNs) для классификации может привести к потере пространственной информации и затруднить точную сегментацию из-за операций объединения и свертки, которые снижают разрешение карт объектов. Стоит отметить, что DLA широко применяются в различных задачах обработки изображений, включая улучшение изображения, шумоподавление, реконструкцию со сверхразрешением, регистрацию изображений, объединение изображений, выделение признаков и классификацию изображений.

Для удовлетворения потребности в крупномасштабных данных в DLA методы расширения могут увеличить количество обучающих выборок и значительно снизить риск переобучения модели. Синтетические методы, такие как генеративные состязательные сети (GAN) позволяют генерировать виртуальные выборки, которые очень похожи на реальные

данные. Кроме того, подходы к передаче знаний используют знания, полученные из предварительно подготовленных моделей, для решения одной задачи и применяют их к новым задачам, позволяя использовать исторические учебные данные без необходимости постоянных ручных усилий.

Что касается предварительной обработки изображений, методы изображения с высоким разрешением эффективно решают проблемы низкого качества изображения, размытых областей интереса и необходимости эффективной реконструкции изображения в приложениях RS. Кроме того, такие методы, как регистрация изображений с использованием GANs, помогают в выравнивании и наложении изображений, полученных в разное время или с разных датчиков.

При классификации изображений были предложены новые подходы для преодоления проблем, уникальных для изображений с высоким разрешением, включая небольшие различия между классами, низкое сходство внутри классов и трудности с получением детальных структурных особенностей. Например, был представлен самокаскадируемый CNN, метод, специально разработанный для решения этих проблем. Кроме того, методы адаптации к предметной области, такие как комплексный подход, сочетающий контрастивное обучение и состязательное обучение, предоставляют практические решения для согласования представлений изображений высокой размерности между исходным и целевым доменами.

Интеграция знаний предметной области и экспертных систем.

Исследования по идентификации горных пород в районах, покрытых растительностью, столкнулись с двумя практическими проблемами. Во-первых, высокая изменчивость внутри классов горных пород и сходство между различными классами привели к низкой точности идентификации. Во-вторых, существует сложная взаимосвязь между растительностью и типами горных пород. Например, на известняковых участках встречаются типы растительности, такие как вечнозеленые широколиственные леса и кустарниковые заросли. Основная порода вечнозеленых широколиственных лесов состоит из известняка и известковистого доломита.

Для решения этих проблем интеграция знаний предметной области и экспертных систем в процесс классификации может повысить интерпретируемость и точность идентификации горных пород в районах, покрытых растительностью. Комбинируя геологические, топографические, почвенные, экологические и ботанические знания, можно разрабатывать модели, основанные на знаниях. Эти модели предназначены для создания индивидуальных систем классификации горных пород для различных областей исследования, предоставляя ценную информацию для точной классификации и поддерживая принятие решений в различных приложениях.

5. Выводы.

Технологии дистанционного зондирования из нескольких источников, в частности гиперспектральные данные и радиолокационные данные, стали свидетелями быстрого прогресса в методах обработки ДДЗ. В результате исследования по составлению литологических карт районов, покрытых растительностью, во всем мире значительно ускорились, что привело к заслуживающим внимания достижениям. Однако, несмотря на эти достижения, в эпоху больших данных эта область сталкивается с рядом проблем.

Вариативность применимости ДДЗ в разных регионах требует обширных экспериментов, в то время как ограничения в диапазоне охвата и механизмах коммерциализации препятствуют использованию датчиков дистанционного зондирования со сверхвысоким пространственным разрешением.

Несмотря на раннее предложение использовать подавление растительности для получения информации о недрах, не хватало существенных инноваций для расширения применения VSM в эффективном решении сложной взаимосвязи между растительностью и литологией.

Объединение данных из нескольких источников предполагает интеграцию разнообразных данных датчиков за разные периоды времени и с различными углами приема сигнала. Это требует дальнейшего совершенствования специализированных алгоритмов для эффективного объединения данных из нескольких источников.

В эпоху больше-объемных данных извлечение и использование ценной информации для задач классификации становится критически важным. Необходимы дальнейшие исследования при разработке интеграции алгоритмов или гибридной интеграции алгоритмов, учитывая, что отдельные алгоритмы имеют свои уникальные сильные и слабые стороны.

Глубокое обучение внесло значительный вклад в обработку изображений, но требуются дополнительные исследования для изучения его инновационного применения в литологическом составлении карт в районах, покрытых растительностью.

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ASTER
для определения поисковых признаков подформных хромитов
(район Хойского офиолита, СЗ Иран)

Введение.

Картирование офиолитовых толщ стало предметом исследовательского интереса ученых и геологоразведчиков во всем мире, поскольку в них содержатся полезные ископаемые, такие как хром, медь, марганец, золото, никель, барий, свинец и цинк. Офиолитовые ультрамафитовые породы являются вмещающими для подформного хромитового оруденения. Подформные хромитовые руды представляют собой небольшие магматические хромитовые тела, образованные на нижнем уровне офиолитового комплекса. На подформных хромитовых рудниках добывается 57,4% от общего объема добычи хромита в мире.

Офиолитовые зоны в Иране широко распространены и часто встречаются в разных местах с различными геологическими и тектоническими условиями. Офиолитовый комплекс Хой является частью тетиолитового пояса и является одним из крупнейших иранских офиолитовых комплексов, охватывающих обширную территорию на СЗ Ирана.

Ультрамафитовые породы, которые часто серпентинизированы, широко распространены на площади в 250 км² Хойского офиолита. Офиолит Хой является одним из наиболее перспективных районов для поиска месторождений хромита из-за обширных выходов ультрамафитовых пород. На данный момент в этом районе выявлено более 20 месторождений хромита. Эти объекты имеют линзовидную, трубчатую и жильноподобную формы, в которых присутствует серпентинизированный гарцбургит. Месторождения хромита в офиолите Хой можно четко разделить на две группы: хромиты с высоким содержанием Al (Cr# = 0,38-0,44) из восточного офиолита и хромиты с высоким содержанием Cr (#Cr = 0,54–0,72) из западного офиолита. Большинство иранских офиолитовых зон расположены в горных и труднодоступных регионах. Поиск месторождений хромита с помощью геологического картирования является сложной задачей и требует много времени.

Анализ данных дистанционного зондирования (ДДЗ) играет важную роль в поисках месторождений полезных ископаемых, а также в литологическом картировании и обнаружении сопутствующей гидротермальной минерализации в Иране. Усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения (ASTER) был создан для картирования геологических структур и обнаружения гидротермально измененных минералов или комплексов.

Платформа ASTER движется по почти круговой солнечно-синхронной орбите с наклоном приблизительно 98,2°, высотой 705 км и циклом повторения продолжительностью 16 дней, предлагая улучшенное пространственное, спектральное и

временное разрешения. Они составлены из трех видимых и ближних инфракрасных спектральных диапазонов (VNIR, от 0,52 до 0,86 мкм, с пространственным разрешением 15 м) и инфракрасного, отражающего излучение в шести коротковолновых инфракрасных спектральных диапазонах (SWIR, от 1,6 до 2,43 мкм, с пространственным разрешением 30 м). Характеристики датчиков ASTER приведены в таблице 1.

Табл. 1.

Характеристики датчиков приборов ASTER.

Sensor Characteristics	ASTER					
	VNIR		SWIR		TIR	
Spectral bandwidth range (μm)	Band01	0.52–0.60	Band04	1.6–1.7	Band10	8.125–8.475
	Band02	0.63–0.69	Band05	2.45–2.185	Band11	8.475–8.825
	Band03N	0.76–0.86	Band06	2.185–2.225	Band12	8.925–9.275
	Band03B	0.76–0.86	Band07	2.235–2.285	Band13	10.95–10.95
	Backward-looking		Band08	2.2295–2.365	Band14	10.95–11.65
Spatial resolution (m)	15		Band09	2.36–2.43		
Swathwidth (km)	60			30		90
				60		60

Из-за большой распространенности ультрамафитовых пород, которые являются вмещающими для месторождений хромита в офиолите Хой, вероятность обнаружения новых месторождений высока, и необходимы дополнительные исследования. Учитывая чрезвычайно пересеченную топографию с труднодоступностью, для этой цели могут быть полезны новые методы поисков, такие как метод ДЗ. В настоящем исследовании оценивается выделение хромитоносных минерализованных зон в пределах Хойского офиолитового комплекса путем анализа возможностей спутниковых данных ASTER. Данные усовершенствованного космического термоэмиссионного и отражательного радиометра (ASTER) позволяют легко разделить, определить протяженность и составить подробные геологические карты ультраосновных пород.

Извлечение спектральной информации, связанной с картированием офиолитов, может быть достигнуто с помощью таких методов обработки изображений ASTER, как соотношение полос (BR) и анализ главных компонент (PCA). Цветовой состав в соотношении полос (4/1, 4/5, 4/7) является эффективным средством определения литологических комплексов офиолитов.

Методы анализа основных компонент и соотношения полос очень полезны для определения серпентинизированного дунита, вмещающего хромитовые жилы. Была использована цветовая композиция ASTER с соотношением спектральных полос 4/7, 4/1, 2/3, 4/3 и RGB (4/7, 3/4, 2/1) для картирования офиолитовых образований, метаосаждений, вулканитов и гранитоидов в юго-восточной пустыне Египта. Был также использован анализ основных компонент ДЗ ASTER для определения литологических единиц офиолитовых комплексов в Пакистане. В восточных офиолитах Египта использовали соотношения полос (7+9)/8, (5+7)/6, (2+4)/3, и PCA (4,5,2) для литологического картирования. Было проведено

исследование с использованием данных ASTER по офиолитам Абдашт на северо-востоке Ирана.

1. Описание офиолитового комплекса Хой.

Офиолит Хой занимает площадь около 3900 км² на СЗ Ирана вдоль ирано-турецкой границы (рис. 1).

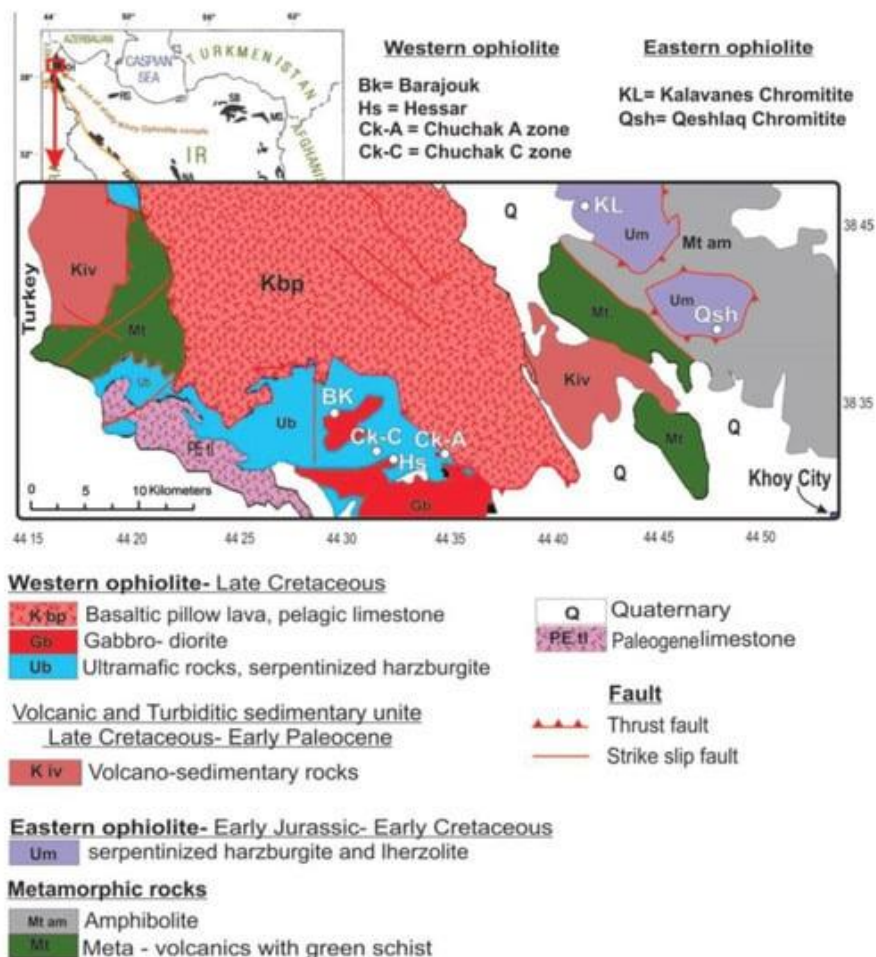


Рис. 1. Геологическая карта, показывающая офиолиты Ирана: КН, Хой; MS, Мешхед; RS, Решт; SB, Сабзевар.

Докембрийские метаморфические породы, включая метавулканические, амфиболиты, гнейсы с Rb-Sr возрастом 663 млн лет, являются древнейшими породами в этой области и расположены в восточной части офиолитовой зоны. Эта зона является остатком ветви Неотетического океанического бассейна. Она соединена с северо-восточным офиолитом Турции в Западных Понтидах. Возраст этой офиолитовой зоны составляет от $81,2 \pm 2,1$ до $69,4 \pm 1,6$ млн лет.

Новые геохимические и полевые исследования офиолита Хой показывают, что в этом районе существуют два офиолитовых комплекса с разным геологическим возрастом: (1) восточно-хойский офиолит ранней юры и раннего мела и (2) западно-хойский офиолит позднего мела. Второй представляет собой остаток океанической коры неотетического

периода. Офиолит Хой содержит все части офиолитовой толщи. Он состоит из серпентинизированного перидотита, слоистого и изотропного габбро, изолированной диабазовой дайки, подушкообразного базальта, массивного слоистого потока и переслаивающихся гиалокластических брекчий и туфов. Ультрамафитовые породы были разрезаны роденгитовыми дайками. Офиолит Хой был покрыт эоценовыми породами, включая известняк, мергель и конгломерат. С офиолитовыми породами связаны отложения типа флиша с возрастом палеоцен-нижний эоцен, которые имеют синорогенные характеристики. После образования офиолитового комплекса в конце нижнего эоцена произошла магматическая активность от кислой до промежуточной, в виде мелких гранитоидных интрузивных пород и андезитово-дацитовых вулканитов и их субвулканических эквивалентов.

Серпентинизированные гарцбургиты и родственные породы в западном офиолите Хой представлены интрузиями габбро–диоритов, которые появляются в виде пятен. В ультраосновных породах западного хойского офиолита содержится несколько подформных хромитовых тел. Залежи хромита имеют линзовидную, табличную и неправильную форму жил и залегают в обедненном мантийном гарцбургите. Выявленные рудные тела в целом не согласуются с вмещающими их гарцбургитовыми породами. Они окружены дунитовыми оболочками переменной толщины. Наличие дунитовой оболочки различной мощности является общей характеристикой всех хромитовых рудных тел. Большинство объектов - небольшие с запасами в несколько десятков тысяч тон.

2. Результаты исследований.

Данные ASTER состоят из сцены уровня 1B, полученной в 2002 году. Изображения были привязаны к северной проекции зоны UTM 38 с использованием данных WGS-84. Атмосферная коррекция в диапазонах VNIR и SWIR применялась методом логарифмических остатков. Коэффициент корреляции, коэффициент оптимального индекса, анализ главных компонент и соотношение полос были использованы для литологического картирования. На рисунке 2 показаны полевые фотографии исследуемого района.

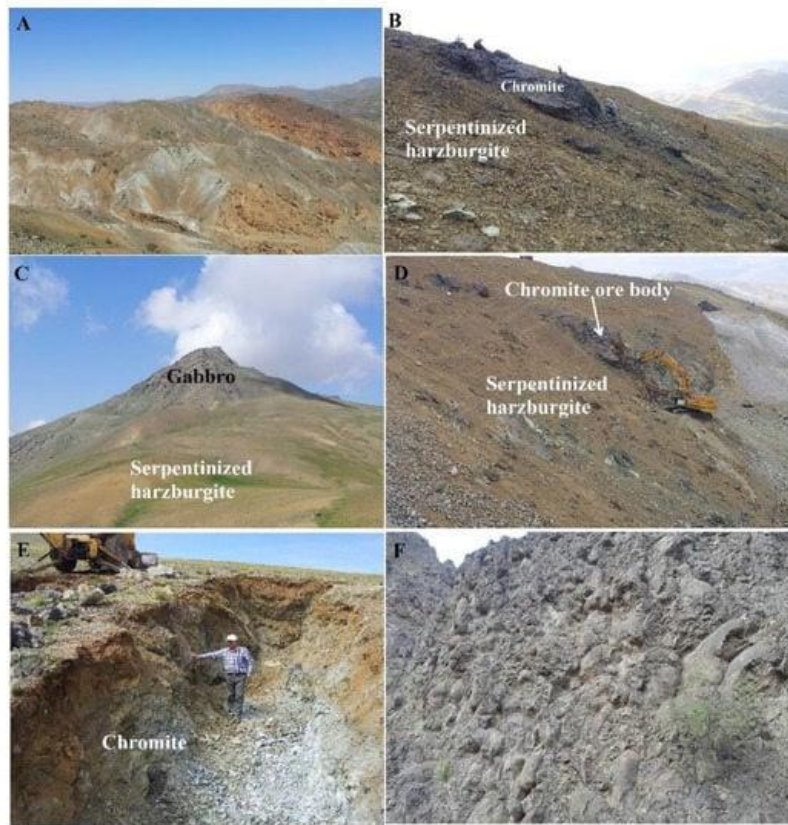


Рис. 2. (А) серпентинизированный гарцбургит; (В) хромит линзовидной формы в пределах серпентинизированного гарцбургита; (С) габброидная интрузия в ультраосновных породах; (D) хромитовое рудное тело; (Е) хромитовое рудное тело в пределах серпентинизированного гарцбургита, (F) базальтовая подушечная лава.

2.1. Методология.

В ходе лабораторных исследований был изучен спектры отражения некоторых пород различных офиолитовых блоков. На рисунке 3 показаны спектральные измерения минералов, обнаруженных в гарцбургитах и габбро.

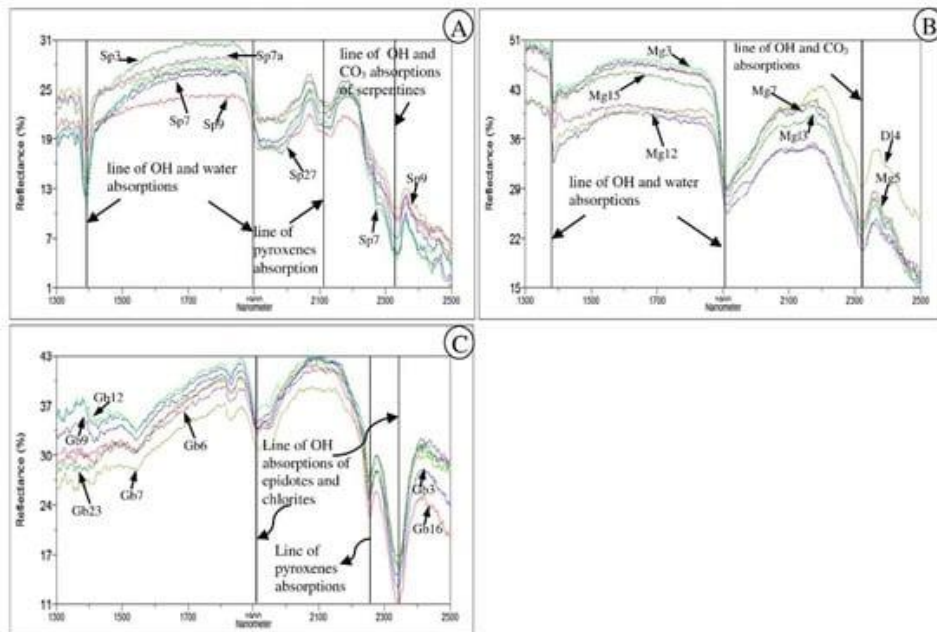


Рис. 3. Спектральные графики (А) гарцбургитов; (В) гарцбургитов с карбонатами; (С) габбро.

ASTER с двумя сериями данных VNIR и SWIR дал хорошие результаты для разделения литологических единиц. Были использованы соотношения полос 4/7, 4/1, $2/3 \times 4/3$ и 4/7, 3/4, 2/1 в формате RGB для картирования офиолитов, метаосаждений, вулканитов и гранитоидов, а также дополнительно - $(2+4)/3$, $(5+7)/6$, и $(7+9)/8$. Эти новые соотношения лучше подходят для разделения литологических единиц офиолитов. PCA является известным методом литологического картирования и картирования гидротермальных изменений в металлогенических исследованиях. В этом методе для расчета изображений использовалась взаимосвязь между спектральными откликами целевых минералов или пород с числовыми значениями, извлеченными из матрицы собственных векторов. Используя это соотношение, можно определить, какие ПК содержат спектральную информацию, связанную с минералами, и имели ли цифровые номера (DNS) пикселей, содержащих целевые минералы, высокие (яркие) или низкие (темные) значения. Объединение анализа основных компонентов, которые содержат наибольшую информацию, и основных компонентов, которые содержат наименьшую информацию, предоставляет данные о разделении литологических и минерализованных зон.

Оптимальный коэффициент индекса (OIF)

Общие полосы VNIR и SWIR данных ASTER включали 63 различных комбинации полос, причем полосы 3, 6 и 8 имели самый высокий OIF. Использование комбинации различных полос привело к повышению спектральной точности полос с низкой корреляцией, особенно тепловых полос. Для получения наилучших композитов с ложными цветами требуются расчеты OIF (более высокие цветовые сочетания OIF содержат больше информации):

$$OIF = \left(\sum_{i=1}^3 S_i \right) / \left(\sum_{i=1}^3 r_i \right) \quad (1)$$

где S_i - стандартное отклонение в каждой полосе, а r_i - соотношение полос два к двум.

Часто сочетания ложных цветов, содержат наиболее важную информацию.

Алгоритм отображения спектральных углов.

Алгоритм отображения спектральных углов предполагает, что пиксели изображений ДЗ представляет определенный материал почв. Алгоритм SAM измеряется на основе степени сходства между двумя спектрами. Спектральное сходство может включать любое количество измеренных спектров (рис. 4). Спектральное сходство между двумя спектрами измеряется путем вычисления угла между двумя спектрами, рассматривая их как векторы в пространстве с размерностью, равной числу полос.

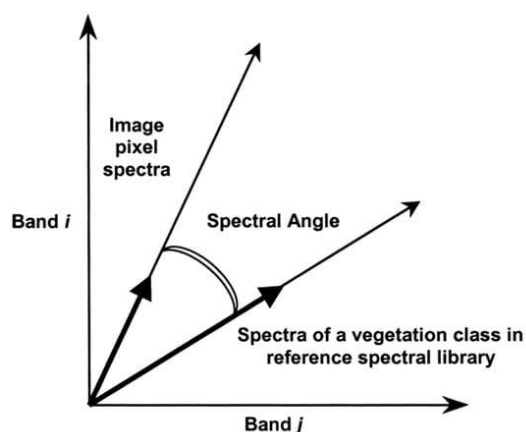


Рис. 4. Представление опорного угла

2.2. ДЗ в исследуемом районе.

Методы оптимального коэффициента индекса (OIF), анализа главных компонент (PCA) и соотношения полос (BR) - это методы отображения спектральных углов, которые были оценены для литологического картирования в этом исследовании. Цветовая композиция RGB (8, 6, 3) показала, что спектральная точность всех диапазонов увеличилась благодаря 15-метровой спектральной точности диапазона VNIR. На рисунке 5 показана цветовая композиция, которая отличает змеевидные дуниты (светло-зеленый), меланжевый (розовый), растительность (красный) и карбонатные породы (желтый).

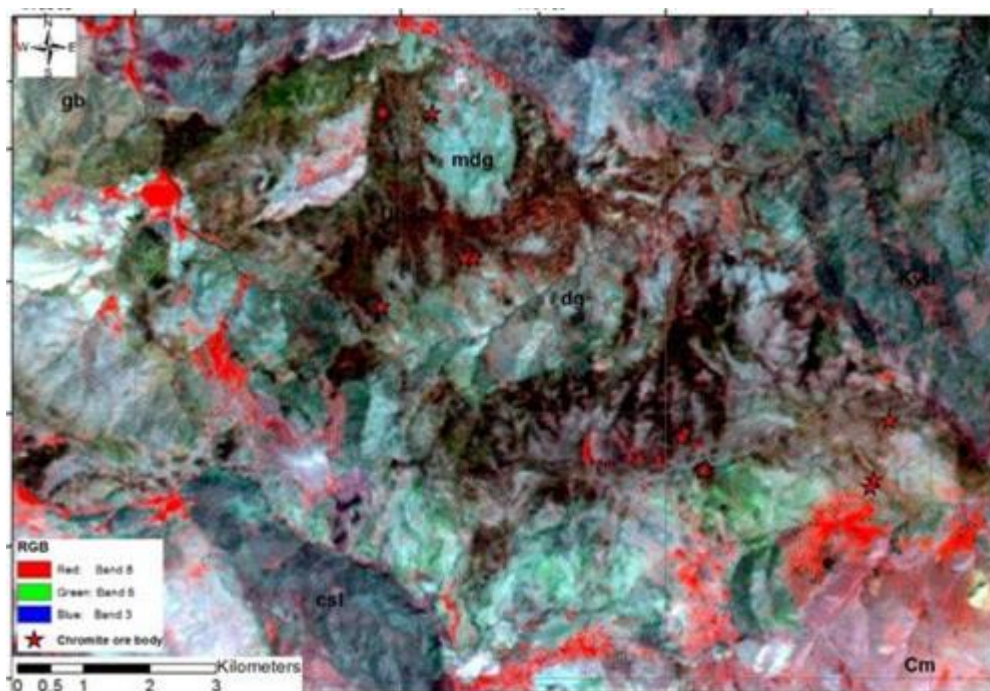


Рис. 5. Цветовая композиция RGB (8, 6, 3) из данных ASTER после необходимых исправлений.

Спутниковые снимки были спроецированы в зоне UTM N38 и исходной точке эллипсоида (сплюснутого сфероида) WGS 1984. Для отображения геологических единиц можем классифицировать похожие пиксели, используя коэффициент оптимального индекса (OIF), соотношение полос (BR) и т.д., и получить начальную карту литологических

единиц. Используя все доступные данные в исследуемом районе, была получена карта литологических единиц (рис. 6).

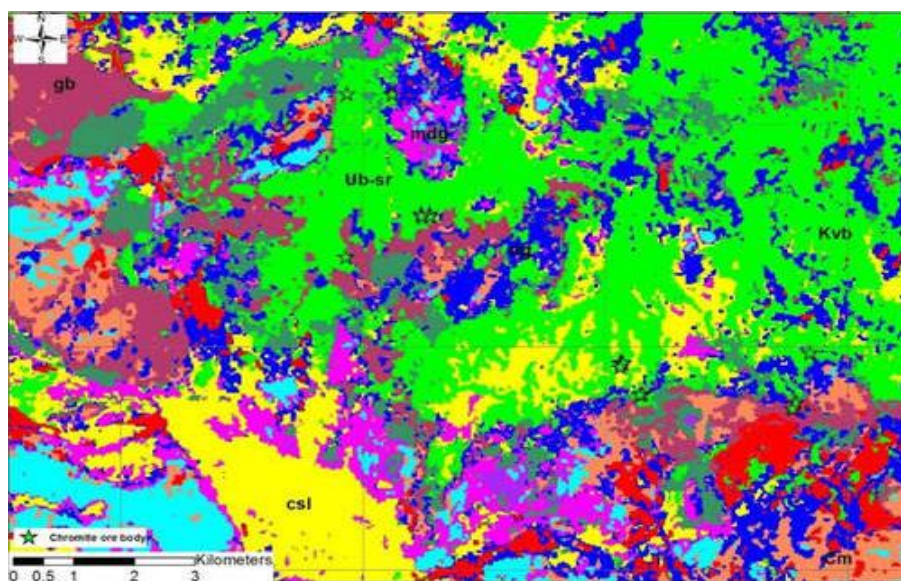


Рис. 6. Классифицированная карта с использованием неконтролируемого метода классификации из чистых пикселей.

2.2.1. Соотношение полос

Метод соотношения полос является методом литологического картирования, особенно для выделения элементов офиолитовых комплексов. Для выделения пород гарцбургита (содержит больше серпентина) и хромитосных минерализованных зон использовались все соотношения полос и их цветовые сочетания (5/7, 5/1, 5/4×4/3), (3/5, 3/1, 5/7), (5/3, 5/1, 7/5) и (7/5, 5/4, 3/1). В исследуемом районе, основываясь на спектральной информации, полученной из полос ASTER, цветовой состав соотношений полос (4+2)/3, (7+5)/6, (7+9)/8 приведены результаты разделения литологических единиц офиолитового комплекса (рис. 7).

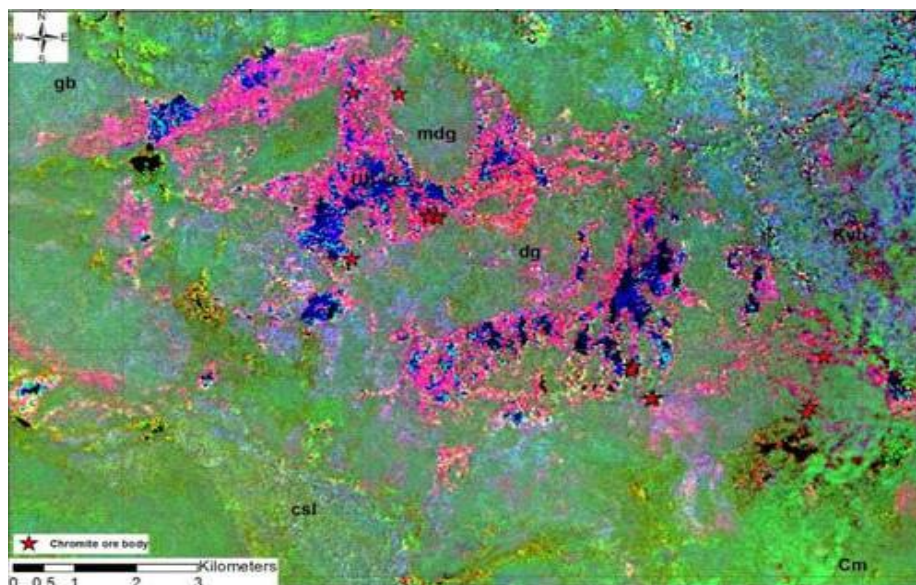


Рис. 7. Разделение гарцбургита (со слабой серпентинизацией) и гарцбургита (серпентинита) с высокой степенью серпентинизации.

В этой цветовой комбинации ультраосновные породы розовые, а более серпентинизированные породы красноватые. В офиолитах Хой не существует определенного соотношения полос для разделения всех единиц, и следует использовать несколько соотношений полос для различения различных литологических единиц.

Интересным моментом, показанным на этом рисунке, является разделение ультраосновных пород в зависимости от степени серпентинизации. Вблизи змеевидных участков скорость серпентинизации резко возросла и стала более красноватой. Синие участки являются ультраосновными с низкой серпентинизацией, которая видна вдали от хромитовых линз. Разница между двумя типами серпентиновых спектров показана на рисунке 8. Таким образом, степень серпентинизации ультраосновных пород может являться поисковым признаком хромитовых линз.

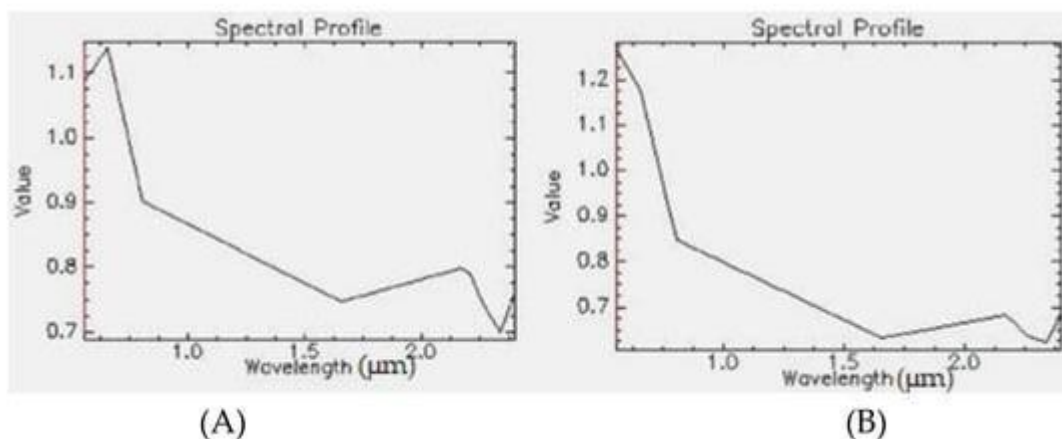


Рис. 8. Спектральные графики двух типов интенсивности серпентинизации: (А) высокая серпентинизация; (В) низкая серпентинизация.

Следовательно, спектральная отражательная способность во второй и первой полосах различна. В результате соотношение полос 2/1 может быть использовано для дифференциации ультраосновных пород с различной интенсивностью серпентинизации. Другим соотношением полос, которое учитывалось в этом исследовании и может быть использовано для выделения потенциальных областей хромита, является RGB (4/5, 4/7, 4/1), ультраосновная область, характеризующаяся оливковым цветом. Диоритовое габбро в основном темно-синего цвета, который вблизи ультраосновных пород имеет желтоватый оттенок. Пиксели, видимые на пересечении этих двух цветов, являются лучшим местом для точек хромитовых линз. Все обнажения хромита в исследуемой области соответствуют этому правилу и могут быть оптимизированы путем создания информационных слоев в программном обеспечении ГИС и определения приоритетности областей (рис. 9).

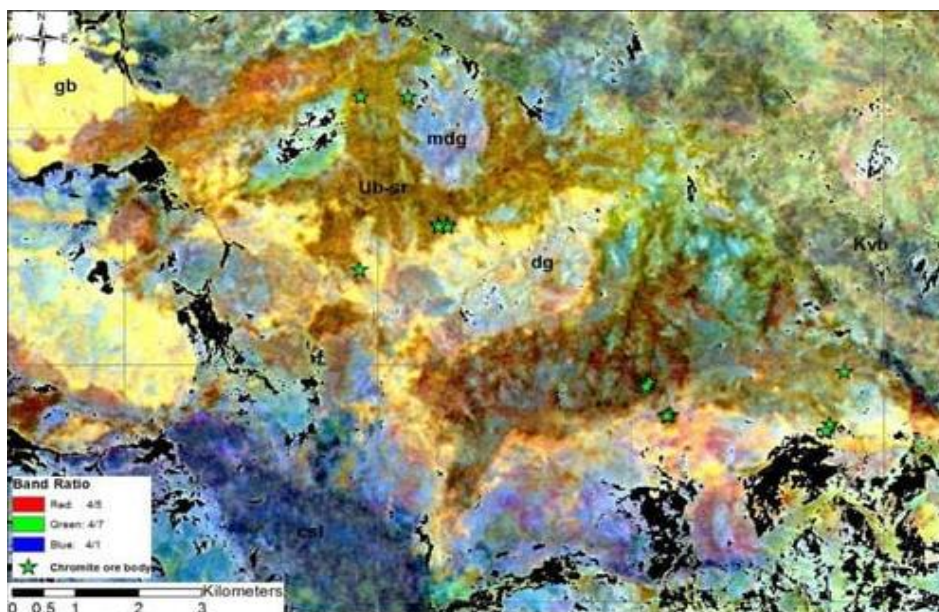


Рис. 9. Изображения ASTER RGB с соотношением полос (4/5, 4/7/4/1) показывают габбро-диорит желтым цветом, серпентинизированный ультраосновный - фиолетовым.

2.2.2. Анализ PCA.

Анализ главных компонент (PCA) использовался для обобщения информации в наборе данных, описываемом несколькими переменными. Использование этого метода позволяет выделить пиксели, которые имеют хорошую спектральную информацию. В этом методе компоненты, содержащие менее 1% информации, удаляются из-за высокого уровня шума в данных. Анализ PCA был применен ко всем девяти полосам, и для разделения были выбраны PCS (1, 2, 3), которые содержали наибольшее количество информации. После расчета PCA было обнаружено, что PC1, PC2 и PC3 имели наибольшие отклонения в данных. Собственные значения для основных компонент всех полос ASTER представлены на рисунке 10.

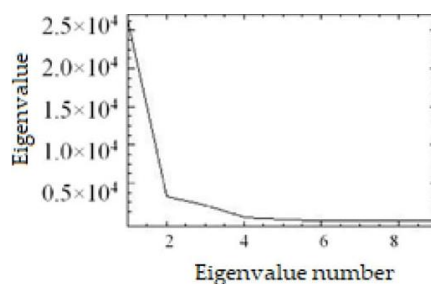


Рис. 10. График собственных значений PCA для полос VNIR + SWIR данных ASTER.

В результате для определения единиц литологии офиолитовых комплексов Хой был использован анализ PCA полос VNIR и SWIR благодаря большому количеству спектральной информации. Результаты показали, что PC1 имел самую высокую положительную дисперсию. Таким образом, компонент PC1 может предоставить больше информации о литологии и минералогии горных пород. Компонент PC2 содержал наибольшую информацию из полос три и один, а его яркие пиксели указывали на кварциты. Анализ основных компонент также проводился на полосах SWIR, которые содержали информацию, отличную

от VNIR + SWIR. В компоненте PC4 силикаты железа и магния были выделены в виде светлых пикселей. Силикаты железа и магния, такие как оливин, гидратированные филлосиликаты железа и магния, такие как серпентин, обладают низкой отражательной способностью в видимой области и высокой отражательной способностью в NIR. Электронные процессы вызывают высокое поглощение в VNIR, поскольку такие катионы, как Fe^{2+} и Fe^{3+} , которые часто заменяются Mn, Cr и Ni, чаще встречаются в кристаллической структуре минералов. PC5 также очень подходит для картографирования растительности, поскольку растительность имеет низкое отражение во второй полосе и высокое отражение в третьей полосе. Кроме того, результаты показали, что от PC6 до PC9 было очень шумно и не хватало надлежащей информации. Наконец, цветные композиции при анализе PC1, PC2 и PC3 дали отличные результаты для разделения блоков пород (рис. 11, 12, 13, 14 и 15).

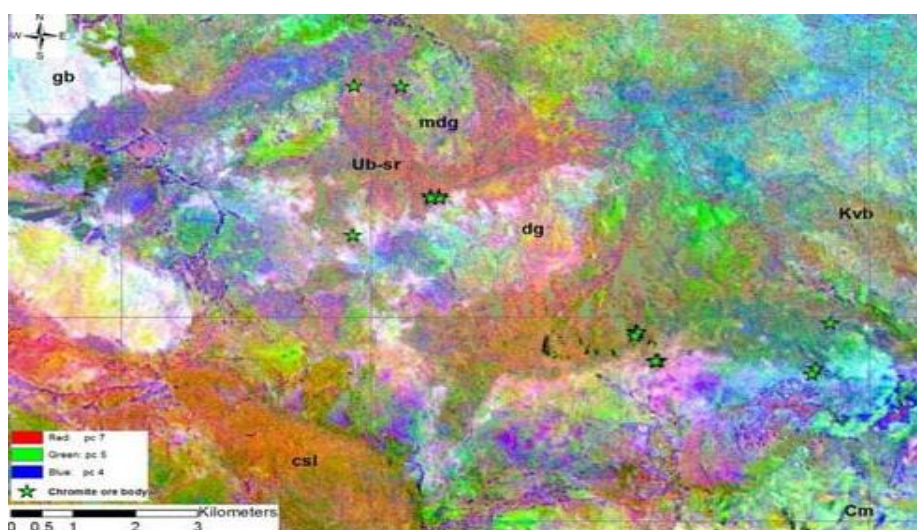


Рис. 11. RGB-изображение полос PC7, PC5 и PC4 PCA в исследуемом районе.

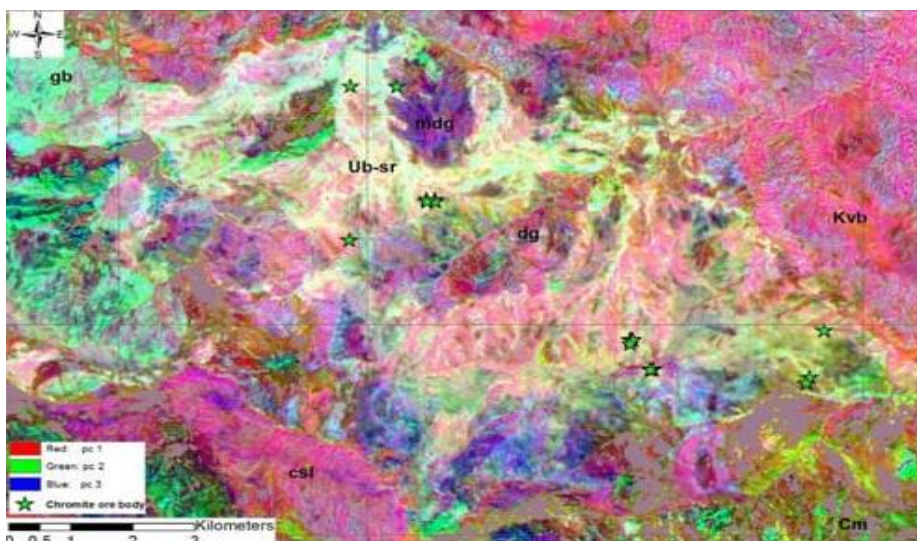


Рис. 12. RGB-изображение полос PC1, PC2 и PC3 PCA: Ub-sr — серпентинизированный ультраосновный; mdg — микродиорит габбро; dg — диорит габбро; Cm — конгломерат; Kvb — базальтовая лавовая подушка; csl — сланцы и конгломерат.

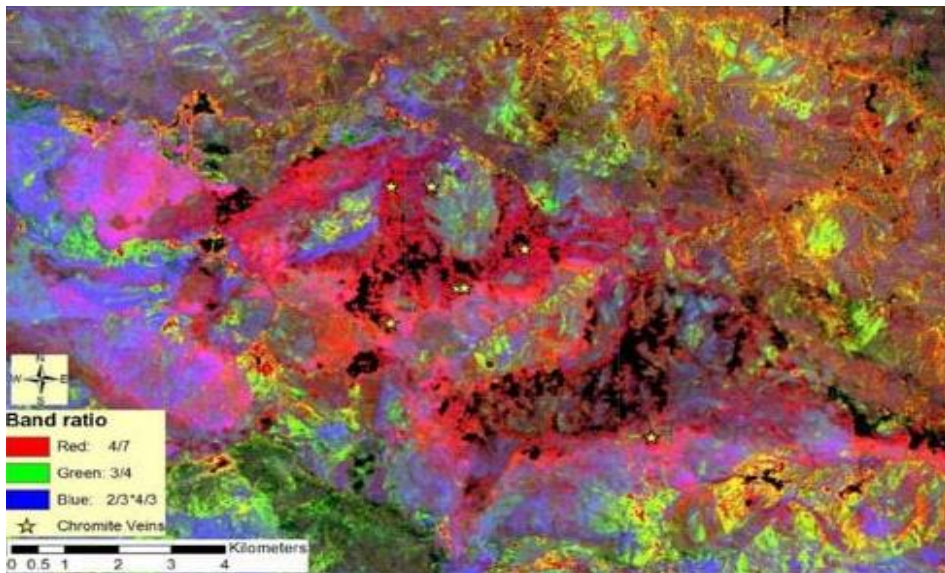


Рис. 13. RGB-изображение соотношения полос (4/7), (3/4), (2/3× 4/3).

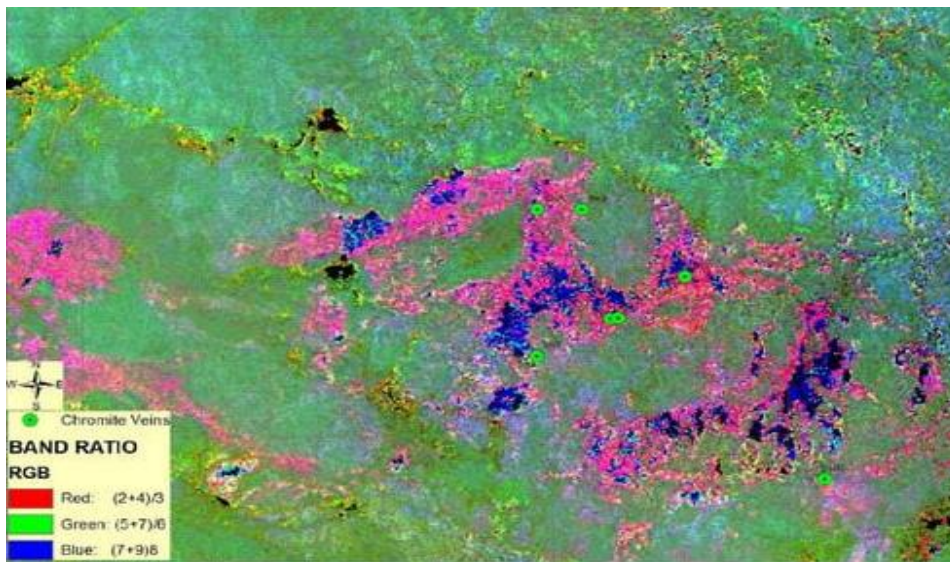


Рис. 14. RGB-изображение с соотношением полос (2 + 4)/3, (5 + 7)/6, (7 + 9)/8.

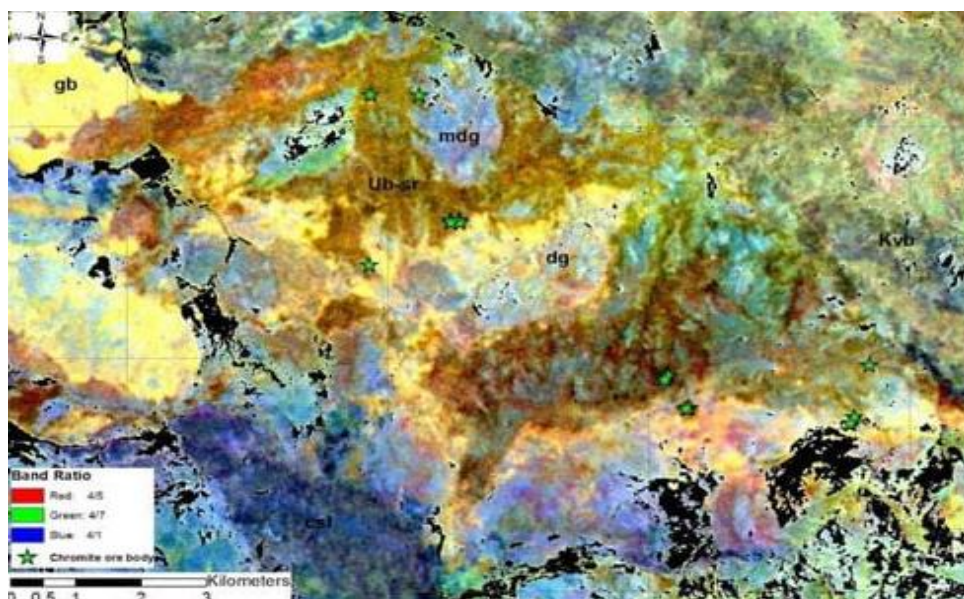


Рис. 15. Сатурное RGB-изображение соотношения полос (4/1), (4/5), (4/7): Ub-sr — серпентинизированный ультраосновный; mdg — микродиорит габбро; dg — диорит габбро; Cm — конгломерат; Kvb — базальтовая лавовая подушка; csl — сланцы и конгломерат.

2.2.3. Картограф спектральных углов

Картограф спектральных углов был одним из наиболее полезных инструментов, использованных в этом исследовании. Спектральная библиотека, или спектр одного из достаточно распространенных обнажений в регионе, использовалась для поиска похожих спектральных пикселей. В этом методе обрабатывались все пиксели, и спектр пикселей, аналогичный спектрам хромита или любого другого минерала в регионе, рассматривался как целевая функция.

Тела хромитов находятся в ореоле дунитов, которые сами заключены в гарцбургит. Дуниты и гарцбургиты серпентинизированы и их разделение практически невозможно. В ходе дальнейших исследований с помощью ДЗ сначала были получены чистые спектральные пиксели, а затем из пяти существующих объектов, которые разрабатывались, были отобраны спектры хромита. Результат этих процедур представлен на рисунках 16, 17, 18 и 19.

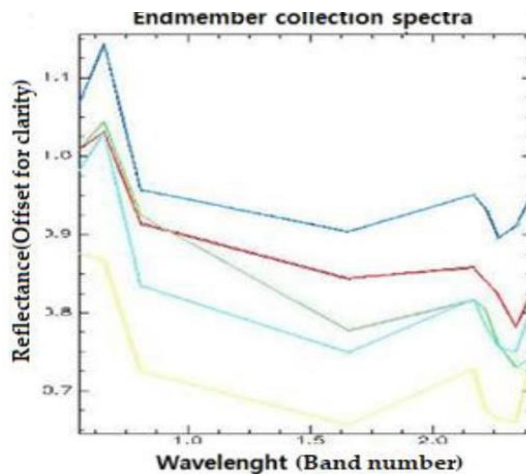


Рис. 16. Спектры отражения гарцбургита, экспонированного в офиолитовой зоне Хой: спектры, пересчитанные на пропуски диапазона ASTER VNIR–SWIR.

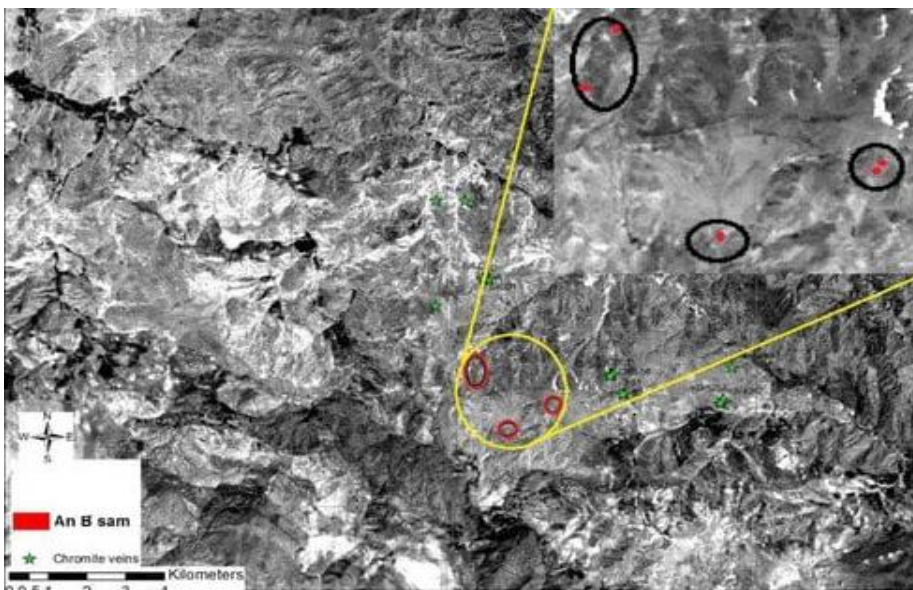


Рис. 17. Пиксели, содержащие хромит из спектров аномалий В и SAM в данных ASTER.

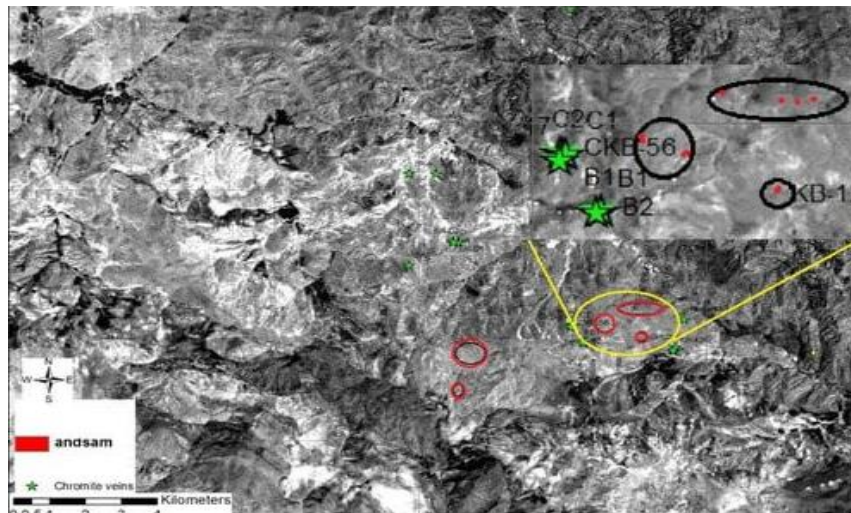


Рис. 18. Пиксели, содержащие хромит из спектров аномалий D и SAM в данных ASTER.

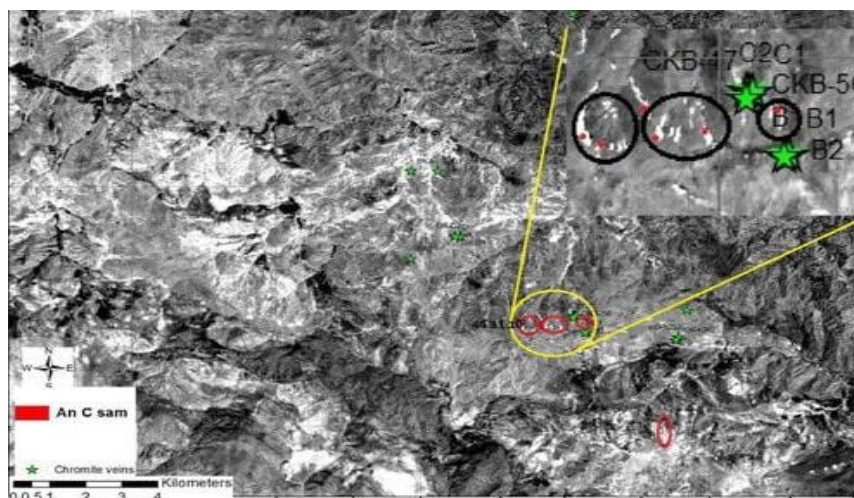


Рис. 19. Пиксели, содержащие хромит из спектров аномалий C и SAM в данных ASTER.

Наконец, с объединением полученных данных, таких как карта разломов, разделенные литологии и подходящие точки из исследований дистанционного зондирования и карт обнажений хромита, были получены перспективные зоны для продолжения поисков в офиолитовом комплексе Хой (рис. 20).

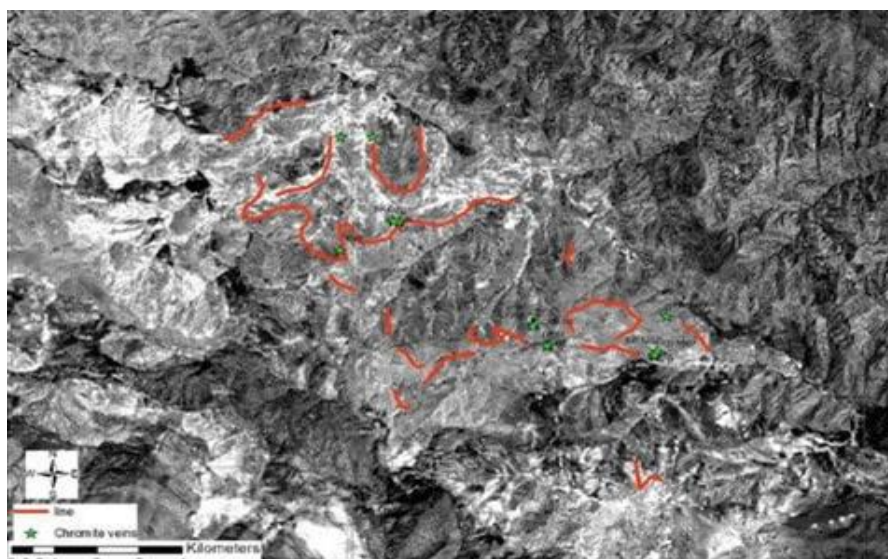


Рис. 20. Перспективные зоны для продолжения поисков в офиолитовом комплексе Хой.

Необходимо проведение геофизических и геохимических исследований в этих зонах (часть из которых уже имеет хромитовые тела) для продолжения поисков. В результате (используя ДДЗ) поиск хромита в офиолитах может быть осуществлен экономически более эффективно. Поисковые маршруты, обусловленные топографией офиолита Хой, также могут быть нацелены на выявление максимально возможного числа хромитовых линз. Благодаря интеграции с геофизическими методами, такими как гравитационные и магнитные измерения, в спроектированных траекториях можно экономично достичь желаемых результатов.

3. Выводы

В этом исследовании полосы VNIR и SWIR данных ASTER использовались для выделения литологических единиц и выделения высокопотенциальных хромитовых зон в комплексе офиолитов Хой.

С использованием методов обработки изображений, таких как метод соотношения полос, анализ главных компонент и алгоритм отображения спектральных углов, была исследована большая площадь этих офиолитов. Интеграция результатов, полученных с помощью алгоритмов обработки изображений, и других наборов данных, таких как геологические карты и др., может дать полезную информацию для поисков хромита как в региональном, так и в районном масштабах.

Это исследование демонстрирует возможности ДЗ для идентификации дунитов/серпентинов или перидотитов в качестве вмещающих пород и зон повышенной серпентизации для локализации хромитовой минерализации в зоне иранских офиолитовых толщ в горных, труднодоступных условиях.

ИСТОЧНИКИ:

1. Douxdoux Kumakele Makutu, Jung Hun Seo, Insung Lee, Jihye Oh, Pilmo Kang, Albert Tienge Ongendangenda and Frederic Mwanza Makoka. «MAGMATIC-HYDROTHERMAL FLUID PROCESSES OF THE SN-W GRANITES IN THE MANIEMA PROVINCE OF THE KIBARA BELT (KIB), DEMOCRATIC REPUBLIC OF CONGO». *Minerals* 2023, 13.
2. Matt Bruce, Oliver Kreuzer, Andy Wilde, Amanda Buckingham, Kristin Butera and Frank Bierlein. UNCONFORMITY-TYPE URANIUM SYSTEMS: A COMPARATIVE REVIEW AND PREDICTIVE MODELLING OF CRITICAL GENETIC FACTORS. *Minerals* 2020.
3. Mehdikhani Behnam and Imamalipour Ali. «ASTER-BASED REMOTE SENSING IMAGE ANALYSIS FOR PROSPECTION CRITERIA OF PODIFORM CHROMITE AT THE KHOY OPHIOLITE (NW IRAN)». *Minerals* 2021.
4. Nina Rethfeldt, Pia Brinkmann, Daniel Riebe, Toralf Beitz, Nicole Köllner 2, Uwe Altenberger and Hans-Gerd Löhmannsröben. «DETECTION OF RARE EARTH ELEMENTS IN MINERALS AND SOILS BY LASER-INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS) USING INTERVAL PLS». *Minerals* 2021, 11
5. Yansi Chen, Yunchen Wang, Feng Zhang, Yulong Dong, Zhihong Song and Genyuan Liu. REMOTE SENSING FOR LITHOLOGY MAPPING IN VEGETATION-COVERED REGIONS: METHODS, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES. *Minerals* 2023.
6. Zhonghai Zhao 1, Jun Chen, Binbin Cheng, Yiwen Liu, Kai Qiao, Xiaomeng Cui, Yechang Yin and Chenglu Li. «SPATIAL ANALYSIS OF STRUCTURE AND METAL MINERALIZATION BASED ON FRACTAL THEORY AND FRY ANALYSIS: A CASE STUDY IN NENJIANG–HEIHE METALLOGENIC BELT». *Minerals* 2023, 13.
7. Zhuo Chen, Jianping Chen, Tao Liu, Yunfeng Li, Qichun Yin and Haishuang Du. REGIONAL QUANTITATIVE MINERAL PROSPECTIVITY MAPPING OF W, SN, AND NB-TA BASED ON INTEGRATED INFORMATION IN RWANDA, CENTRAL AFRICA. *Minerals* 2023.