



ФГБУ «ВИМС»

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

№ 5

Редактор-составитель: В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:	стр.
1. МОНИТОРИНГ ТЕНДЕНЦИЙ ГРР ЗА РУБЕЖОМ	
<i>(2021-22 гг.)</i>	4
1.1 Завершенные проекты ГРР.....	4
1.2 Литиевый «бум».....	5
2. ПОИСКИ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ ДДЗ	10
2.1 Введение.....	10
2.2 Основные результаты.....	10
2.3 Основные проблемы.....	15
2.4 Перспективы на будущее.....	17
2.4.1 Аппаратура ДДЗ.....	17
2.4.2 Алгоритмы обработки изображений.....	19
2.5 Выводы.....	22
3. ГРР НАЧАЛЬНОЙ ПОИСКОВОЙ СТАДИИ НА СКРЫТОМ ОБЪЕКТЕ	
<i>(Северо-Западные Территории, Канада)</i>	24
3.1 Региональная геология.....	24
3.2 Геология объекта.....	26
3.3 Минерализация, ожидаемые типы месторождений.....	28
3.4 Выполненные ГРР.....	29
3.4.1 Параметры и процедуры геофизической программы.....	31
3.4.2 Интерпретация геофизических данных.....	33
3.4.3 Пробоотбор, аналитика.....	34
3.5 Результаты.....	35
4. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПОИСКАХ МАРГАНЦА	
<i>(массив Обан, Ю-В Нигерия)</i>	37
4.1 Введение.....	37
4.2 Геологические условия.....	38
4.3 Материалы и методы.....	39
4.3.1 Сбор данных.....	39
4.3.2. Обработка и анализ.....	40
4.4 Выполненные ГРР.....	43
4.4.1. Полевое геологическое картирование.....	43
4.4.2. Геофизические исследования.....	45
4.5 Результаты.....	50

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ASTER и WORLDVIEW-3 ПРИ ПОИСКАХ (<i>м-ние Пуланг, ЮЗ Китай</i>).....	51
5.1 Введение.....	51
5.2 Материалы и методы.....	52
5.2.1 Геологические условия.....	52
5.2.2. ДДЗ.....	54
5.2.3. Методы картирования минералов гидротермальных изменений...55	
5.3. Результаты.....	57
5.3.1 Извлечение изменений различных минералов с использованием комбинации методов.....	57
5.3.2 Признаки изменений минералов в разломах.....	61
5.3.3 Реконструкция зональности изменений.....	63
5.3.4 Определение потенциальных поисковых участков.....	65
6. ГРП НА УРАНОВОМ ПРОЕКТЕ ОЗЕРА ХУК (<i>бассейн Атабаска, Канада</i>).....	67
6.1 Геологическая обстановка.....	67
6.2 Урановое оруденение.....	69
6.3. Программы ГРП.....	73
6.3.1 Геохимические исследования.....	73
6.3.2 Аэрогеофизические исследования.....	75
6.3.3 Наземные электромагнитные исследования.....	84
6.3.4 Наземная гравитационная съемка.....	86

1. МОНИТОРИНГ ТЕНДЕНЦИЙ ГРР ЗА РУБЕЖОМ (2021-22 гг.) [3,4,8]

1.1 Завершенные проекты ГРР.

Был проведен первичный анализ более 100 технических отчетов (NI 43-101 english) по ГРР различных стадий в период с 03/2021 по 10/2022 гг. Сокращение объектов ГРР ~ в 4 раза по сравнению с предыдущим периодом (2020-21 гг.) видимо связано с «ковидными» ограничениями.

Работы велись в основном юниорными канадскими, американскими и австралийскими компаниями на объектах ТПИ в более чем 20 странах на всех континентах. Направленность этих работ в соответствии с зарубежной классификацией типов месторождений ТПИ показана на рис. 1.

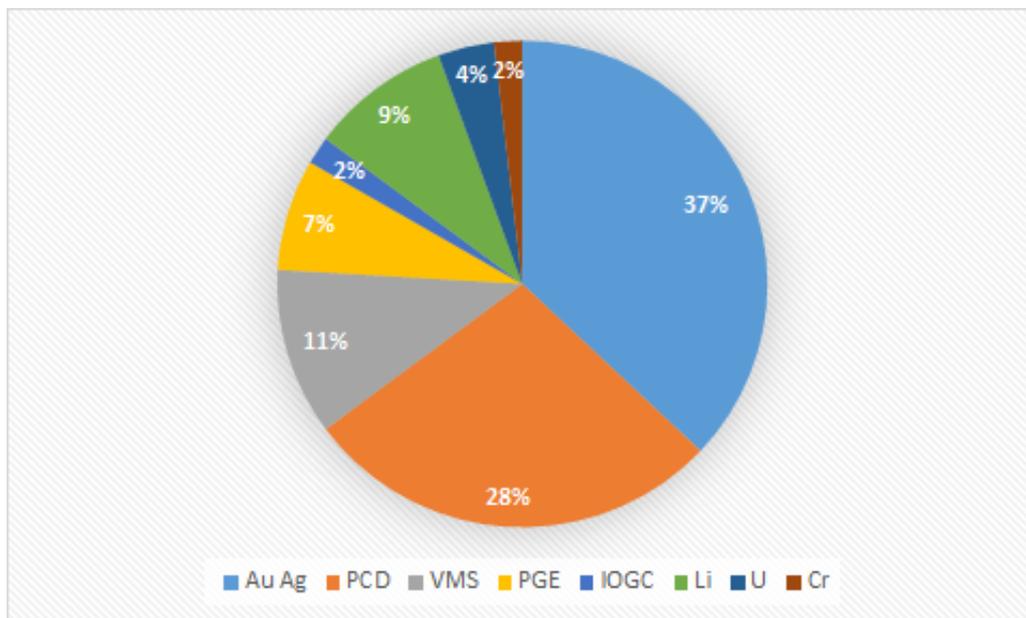


Рис. 1 Завершенные объекты ГРР в мире 2021-22 гг.

Неизменными лидерами по количеству традиционно являются «золотые» объекты - 37%, включающие основной «орогенный» жильный золотой и золото-серебряный типы, а также «золото древних формаций» и в меньшей степени «карлинский» тип, россыпи и др.

По-прежнему сохраняется слабая активность западных компаний на ГРР урановорудных объектов в связи с конъюнктурой мирового рынка, в первую очередь на объекты типа «несогласия».

Значимыми типами ТПИ для РФ являются, связанные с активными молодыми и древними континентальными окраинами - PCD (медные с золотом, молибденом, вольфрамом, полиметаллами и др.); нетрадиционные для РФ IOGC (с медью, золотом, серебром, ураном, кобальтом, REE и др.); VMS (полиметалльные свинец-цинк с золотом, медью, серебром в колчеданных в вулканогенных толщах), PGE объекты

(«Норильский тип»), а также разнотипные коренные редкометально-редкоземельные месторождения

Наибольший интерес для зарубежных горно-добывающих компаний представляют комплексные рудные месторождения (в сумме около 50% объектов ГРП):

1. PCD Porphyry copper deposits (Cu-Au-Mo etc)
2. VMS Volcanic massive sulphide deposits (Zn-Pb-Ag-Au-Cu etc)
3. PGE Platinum group element deposits (Ni-Cu-Pt-Co etc)
4. IOGC Iron oxide copper gold ore deposits (Cu-Au-Co-U-W etc)

1.2 Литиевый «бум».

Прошедший период в мировом минерально-сырьевом комплексе характеризуется возникновением нарастающего бума на литиевое сырье.

Литий важен при производстве аккумуляторов, для питания смартфонов, ноутбуков и транспортных средств. Поскольку мир с каждым днем приближается к миру, работающему на батарейках, поиск надежного и устойчивого источника лития становится все более актуальной задачей.

В 2021-22гг. были запущены десятки новых проектов ГРП на литиевое, редкометально-редкоземельное минеральное сырье, причем большая их часть связана с коренными пегматитовыми и другими источниками (рис. 2).

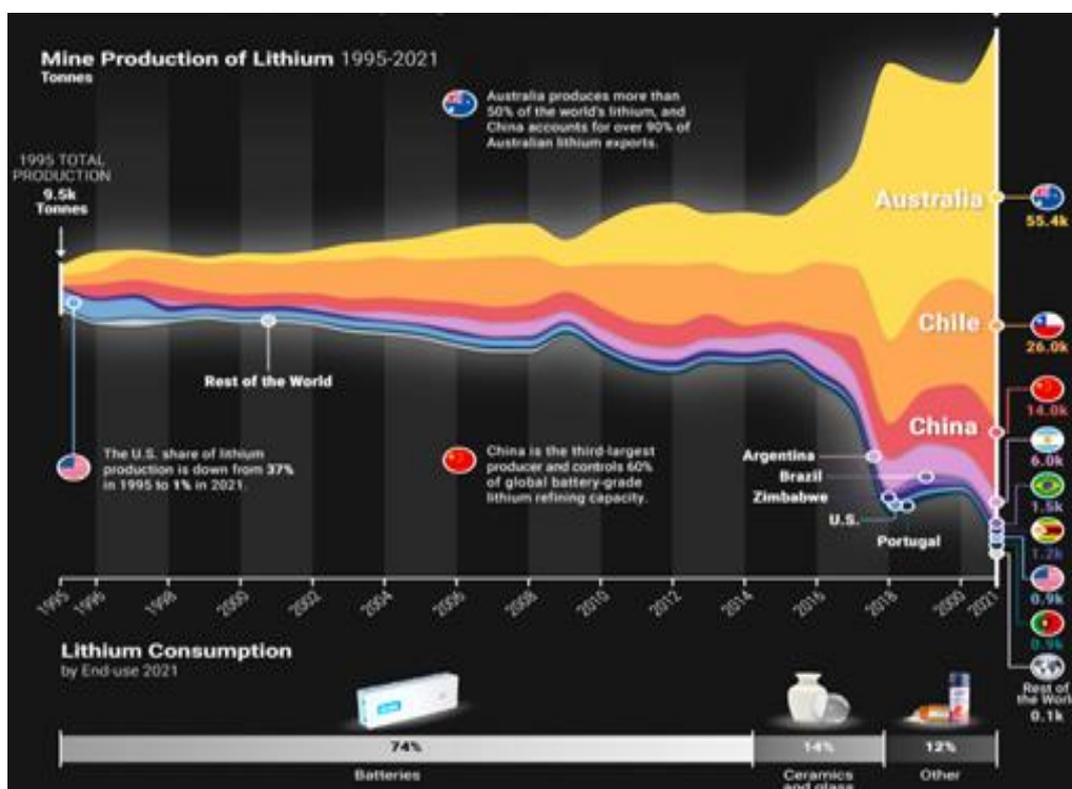


Рис. 2 Инфографик более чем 25-летнего периода производства лития по странам с 1995 по 2021 г.

Аргентина занимает третье место в мире по запасам лития и использует метод солнечного выпаривания для извлечения лития из рассола. В соларах Аргентины, солевой раствор закачивается в неглубокие пруды, где может происходить более интенсивный процесс испарения.

В Боливии находится крупнейшая в мире соляная равнина, известная как Салар-де-Уюни, протяженностью почти 5000 миль. При производстве лития здесь также используется метод солнечного испарения, однако это делается в очень сухом климате, поэтому вода является особенно важным ресурсом, который необходим для процесса.

В настоящее время в Чили находится крупнейший в мире источник лития в бесплодной соленой пустыне, известной как Салар-де-Атакама. Климат этой пустыни помогает методу солнечного испарения ускорить переработку лития, оставаясь сухим большую часть года и поддерживая высокую скорость испарения, что делает процесс производства лития наиболее эффективным, устойчивым и недорогим из существующих на сегодняшний день.

В Китае, озеро Забуйе, обеспечивает рассол соленой воды, который содержит карбонат лития. Озеро снабжается дождевой водой, тающим льдом и подземными источниками. Литий извлекаемый из рассола был основным источником лития в Китае в 2010-е годы. Поскольку в последние годы спрос на литий вырос, китайские компании стремятся увеличить свои литиевые ресурсы.

В Австралийских литиевых шахтах литий добывается из коренных пород традиционными методами. Производятся две категории литиевых концентратов - технического качества и химического. Технический литий используется в производстве стекла, керамики и жаростойкой посуды. Литий химического класса используется для производства литиевых химикатов, которые составляют основу для литий-ионных аккумуляторов для портативных компьютеров, мобильных телефонов и электромобилей.

Канадские производители добывают литий из коренных пород, содержащих карбонат лития, открытым способом, до глубин примерно в 150 м. Руда, добытая из карьеров, измельчается и отправляется на перерабатывающие заводы. Литий, добываемый в Канаде экспортируется по всему миру.

Добыча лития в России пока остановлена, поскольку метод добычи из коренных пород является дорогостоящим и трудоемким. По этой причине российские производители лития закупают необработанный литиевый рассол у производителей за пределами страны.

В 1990-е годы США были крупнейшим производителем лития, что резко контрастирует с нынешним положением. Фактически, в 1995 году на долю США приходилось более трети мирового производства лития. С тех пор и до 2010 года Чили стала крупнейшим производителем благодаря буму добычи в Салар-де-Атакама, одном из богатейших в мире месторождений литиевого рассола.

В настоящее время аккумуляторы стали основной причиной экспоненциального роста производства лития. До того, как электромобили и литий-ионные аккумуляторы изменили спрос на литий, конечное использование металла выглядело иначе по сравнению с сегодняшним днем. Так в 2010 году наибольшая доля потребления лития приходилась на керамику и стекло - 31%. В керамике и стеклянной посуде карбонат лития повышает прочность и уменьшает тепловое расширение, что часто необходимо для современных стеклокерамических кухонных плит. Литий также использовался для изготовления смазочных материалов для транспортной, сталелитейной и авиационной промышленности, а также для других менее известных применений.

Мировое производство лития впервые превысило 100 000 тонн в 2021 году, увеличившись в четыре раза по сравнению с 2010 годом. Более того, примерно 90% этого объема поступило всего из трех стран.

Одна только Австралия производит 52% мирового объема лития. В отличие от Чили, где литий добывается из рассолов, австралийский литий добывается в шахтах из сподуменовых пегматитов.

Китай, третий по величине производитель, прочно закрепился в цепочке поставок лития. Наряду с разработкой собственных месторождений, китайские компании за последнее десятилетие приобрели литиевые активы на сумму около 5,6 миллиарда долларов в таких странах, как Чили, Канада и Австралия. Здесь также сосредоточено 60% мировых мощностей по переработке лития для производства аккумуляторов.

Поскольку в мире производится все больше аккумуляторов и электромобилей, спрос на литий, по прогнозам, достигнет 1,5 млн тонн эквивалента карбоната лития (LCE) к 2025 году и превысит 3 млн тонн к 2030 году.

Для сравнения, в 2021 году в мире было произведено 540 000 тонн LCE. Исходя из приведенных выше прогнозов спроса, производство должно утроиться к 2025 году и увеличиться почти в шесть раз к 2030 году. Несмотря на экспоненциальный рост поставок, для запуска новых литиевых проектов может потребоваться от шести до более чем 15 лет. В результате, по прогнозам, рынок лития будет испытывать дефицит в течение следующих нескольких лет.

С резким ростом цен минералы коренных пород, содержащие литий, которые считались неэкономичными, стали экономически выгодными для производства солей Li. В результате извлечение лития из содержащих литий минералов, например сподумен, лепидолит и циннвальдит в последние годы привлекают большое внимание как в промышленности, так и в научных кругах.

Извлечение лития из сподумена. В природе сподумен встречается в форме α -фазы и обычно ассоциируется с кварцем, альбитом, микроклином и слюдами в пегматитах. Однако, когда дело доходит до извлечения, α -фазный сподумен устойчив к воздействию обычных промышленных химикатов. В современной промышленности природный сподумен сначала подвергают прокаливанию при 1000-1100°C в течение 2 часов, чтобы преобразовать его в β -фазу, которая более реакционна по отношению к кислоте или щелочи из-за более «открытого» кристалла.

Извлечение лития из лепидолита. В отличие от сподумена, лепидолит с общей формулой $K(Li, Al)^3(Si, Al)^4O_{10}(F, OH)^2$ является низкосортной литийсодержащей рудой, относящейся к группе слюд. Концентрат лепидолита содержит всего $\sim 4,5\%$ Li_2O , что намного ниже, чем у сподумена. Кроме того, в отличие от сподумена, лепидолит содержит F (теоретически 4,89%), химически активный и вредный элемент, который усложняет процесс образования HF или фторидов при извлечении Li.

Извлечение лития из циннвальдита. Как и лепидолит, циннвальдит также относится к группе слюдяных минералов, но имеет значительно более низкое содержание Li. Циннвальдит имеет общую формулу $KLiFeAl(AlSi_3)O_{10}(F, OH)^2$, что указывает на значительное содержание Fe ($\sim 12,78\%$) и F ($\sim 6,52\%$), которые оба намного выше, чем в лепидолите. Эти различия сделали извлечение лития в больших масштабах из циннвальдита сложной задачей.

Извлечение лития из амблигонита. Амблигонит с общей формулой $(Li, Na)Al(PO_4)(F, OH)$ является разновидностью фторфосфатного минерала. Геологически он встречается в гранитном пегматите и в богатых фтором топазовых гранитах. Как можно рассчитать по формуле, амблигонит имеет высокое теоретическое содержание фосфора P (20,46%) и F (9,41%), что представляет собой другие материалы по сравнению с минералами пегматита на основе силикатов. До сих пор извлечение лития из амблигонита не ведется.

Пока только сподумен нашел надежное промышленное применение для производства солей Li. Из-за экономических, экологических и технических проблем другие литийсодержащие минералы по-прежнему остаются мало востребованными. Недавно был запущен ряд новых пилотных промышленных проектов по переработке

сподумена и лепидолита в Австралии, Канаде, Финляндии и Китае. В частности, сообщается, что Западная Австралия, из-за большого количества и неплохого качества залежей Li, является формирующейся “Литиевой долиной”.

В научных кругах каждый год обновляется ряд достижений в области технологий извлечения лития. На сегодняшний день опубликовано несколько обзоров, касающихся извлечения лития из различных ресурсов, всесторонне обобщающих извлечение лития из первичных и вторичных ресурсов, включая минералы, рассолы, морскую воду, отработанные запасы и т.д. В связи с быстрорастущим рынком электромобилей можно предсказать, что будут предприняты дополнительные усилия по увеличению извлечения лития из его минеральных ресурсов для диверсификации поставок. Следовательно, необходимо обобщить прошлые и современные технологии извлечения лития из минерального сырья и указать на текущие барьеры и будущие тенденции в этой области.

2. ПОИСКИ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ ДДЗ. [5]

2.1. Введение.

Спутниковые данные оптического и теплового дистанционного зондирования являются важным инструментом в поисках, позволяющим определять перспективные рудные районы на протяжении более четырех десятилетий. ДДЗ являются быстрым и недорогим поисковым методом особенно в труднодоступных районах с благоприятной ландшафтно-геоморфологической обстановкой в интеграции с другими геологическими данными. Особенно с использованием мультиспектральных продуктов, а именно снимки с датчиков Landsat и Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Успех датчика ASTER в геологоразведке обусловлен главным образом более высоким спектральным разрешением в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) и тепловом инфракрасном диапазоне (TIR), специально разработанном для геологического применения, что улучшило его литологические и минеральные возможности картирования, особенно при идентификации гидротермально-метасоматических изменений минералов. Появление гиперспектрального дистанционного зондирования позволило напрямую идентифицировать и количественно определять конкретные минералы и их изменения.

В настоящее время зеленые технологии, такие как электромобили, представляют собой важный сектор экономики, а литий стал их важнейшим металлом. Исследование ресурсов лития с использованием данных и методов дистанционного зондирования представляет собой новую область с рядом трудностей и неизвестных возможностей.

Целью данного обзора является:

- 1) предоставление информации о том, чего можно достичь при разведке лития с использованием методов дистанционного зондирования;
- 2) выявление основных трудностей таких исследований;
- 3) возможности преодоления этих трудностей, а также перспективы будущих исследований.
- 4) предоставление разработок, сделанных в области дистанционного зондирования, применительно к разведке Li, что может помочь в формировании новых поисковых критериев и признаков.

2.2. Основные результаты.

Первое применение ДДЗ для поисков Li началось с использования изображений мультиспектральной системы сканирования Landsat (MSS) для обнаружения

геоботанических аномалий, вызванных рассеиванием ореолов металлов, таких как литий, вольфрам и мышьяк, связанных с гранитом Коллет и куполами Бовуар (Франция). Для извлечения спектральной характеристики круговой аномалии были применены соотношения полос 7/5 и 7/6 (полоса 5: от 0,6 до 0,7 мкм; полоса 6: от 0,7 до 0,8 мкм; полоса 7: от 0,8 до 1,1 мкм). Сравнивая спектральные аномалии растительности с геохимическими картами почвы, пришли к выводу, что существует четкое соответствие между спектральными и геохимическими аномалиями.

Изображения ASTER использовали для картирования Li-содержащих пегматитов в регионе Вале-ду-Жекитинья, (Бразилия). Данные в видимом, ближнем инфракрасном диапазоне (VNIR) и SWIR использовали для оценки спектральных характеристик Li пегматитов и связанных с ними минеральных изменений. Для этого целевые спектры определялись путем оценки индекса чистоты пикселей (PPI), либо непосредственно на изображениях с поправкой на атмосферу, либо после применения преобразования данных с минимальной долей шума (MNF). Полученные эталонные спектры использовались для классификации изображения ASTER с использованием spectral angle mapper (SAM) и mixture-tuned matched filtering (MTMF). В лаборатории были собраны эталонные спектры минералов, содержащих Li. Был применен статистический анализ к MNF для определения пикселей с самым высоким PPI, из которых были выбраны эталонные характеристики.

На месторождениях пегматита Фрегенеда-Альмендра (Саламанка, Испания) и Вила-Нова-де-Фош-Коа (Португалия) был применен метод дистанционного зондирования для поисков Li-пегматита на основе мультиспектрального прибора Sentinel-2 (MSI). В исследовании была предпринята попытка идентифицировать Li-пегматиты, главным образом, на основе распознавания связанных с ними ореолов изменений. Для достижения этой цели несколько методов, применяемых к другим типам месторождений, были адаптированы к изображениям Sentinel-2, включая комбинации RGB (красный, зеленый, синий), соотношения полос и анализ главных компонент (PCA). Эти методологии позволили выявить наличие оксидов железа и глинистых минералов, а также провести различие между неизменными и гидротермально измененными зонами. Также была предпринята попытка напрямую идентифицировать Li-пегматиты на основе их спектральных характеристик. Используя эталонные спектры сподумена, было предложено соотношение полос 3/8 для определения присутствия Li-содержащих минералов. Другой подход заключался в использовании контролируемой классификации изображений для картирования Li-содержащих пегматитов. Классификация была выполнена по результирующим

полосам в результате применения PCA с одновременным использованием алгоритмов классификации характеристик растительного покрова (LCS) и максимального правдоподобия (ML). Спектральные кривые, использованные для классификации изображения, были получены на эталонных площадках - открытых рудниках, разрабатывающих литиевые минералы. Были предложены два новых различных подхода: (1) идентификация минералов гидротермальных изменений, связанных с содержащими Li пегматитами; и (2) прямая идентификация минералов Li. Эти методы применялись в различных типах мультиспектральных продуктов, а именно в тематическом картографе Landsat-5 (TM), Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) и тепловом инфракрасном датчике (TIRS), ASTER и Sentinel-2 MSI. Датчик ASTER показал лучшую результативность, поскольку гидроксилсодержащие минералы, такие как глины, были идентифицированы только на изображении ASTER, что отражает более высокие возможности картирования ASTER благодаря его лучшему спектральному разрешению. Для прямой идентификации Li-минералов предложили новые алгоритмы, способные идентифицировать Li пегматиты с лучшей экспозицией. В случае комбинаций RGB (ASTER 5-1-14 и 2-1-13; Landsat-8 7-3-11 и 2-1-11; Landsat-5 7-2-6 и 2-1-6) удалось отличить Li-содержащие пегматиты от вмещающих пород (метапелитов), что не могло быть достигнуто с использованием изображений Sentinel-2 из-за отсутствия полос МДП и важности этой области электромагнитного спектра в силикатных минералах, содержащих Li (сподумен и петалит). Предложенные соотношения полос (ASTER 7/6 и 1/3, Landsat-8 3/5, Landsat-5 2/4, Sentinel-2 3/8) и селективный PCA на основе подмножеств из двух и четырех полос также позволили выделить Li пегматиты, изолируя соответствующие спектральные данные. Несмотря на успех в распознавании Li-пегматита, все методы показали спектральную путаницу в урбанизированных и сельскохозяйственных районах. Методы (комбинации RGB, соотношения полос и селективный PCA) показали различные характеристики на месторождениях пегматита.

В провинции Альто-Лигонья (Мозамбик) использовали изображения ASTER и Landsat-8 для картирования минералов гидротермальных изменений, связанных с Li содержащими пегматитами в мощной каолиновой коре выветривания. Изображения ASTER позволили идентифицировать спектральные признаки гидротермального изменения глины (появления каолина), связанные с пегматитами. Полевые образцы Li минералов, таких как лепидолит и сподумен, были собраны и проанализированы с помощью спектрометра ASD Handheld 2. Результаты классификации с использованием целевых сигнатур, собранных в спутниковых продуктах, позволили

определить две потенциальные области для будущих поисков пегматита. Различные спутниковые продукты (а именно ASTER, Landsat-8 и Sentinel-2) и различные алгоритмы их обработки сравнивались с целевыми Li-пегматитами. Алгоритмы включали три контролируемых метода классификации — минимальное расстояние, SAM и ML — и один неконтролируемый алгоритм: кластеризацию k-средних. Карты классификации показали глинистые минералы, такие как каолинит и монтмориллонит, полученные в результате изменений пегматита. Эти карты были подтверждены полевыми исследованиями.

В работе, посвященной применению классификации изображений при разведке пегматитов Li сравнили производительность двух алгоритмов машинного обучения (MLA), машины опорных векторов (SVM) и случайного леса (RF), используя Sentinel-2A. Оба алгоритма (SVM и RF) правильно отображали залегание Li-пегматитов в карьерах. Хотя SVM достигла более высокой общей точности (98,54%), модель RF (построенная с использованием стратегий балансировки классов; общая точность 97,70%) смогла правильно классифицировать большее количество нанесенных на карту Li-содержащих пегматитов. Несмотря на потенциал, продемонстрированный этим типом подхода, эти методы все еще давали несколько ложноположительных результатов, обусловленных спектральным сходством Li-пегматитов с другими литологиями, а именно с метаосадочными породами. Это может указывать на то, что необходимы изображения с более высоким пространственным разрешением.

Все упомянутые разработки касались применения дистанционного зондирования месторождений Li в коренных породах. Тем не менее, появляются новые данные о других месторождениях Li. Одним из примеров является исследовательский проект “Исследование и мониторинг литиевых ресурсов Корнуолла с использованием космических технологий”, посвященный разведке солей Li. Проект нацелен на поиск подземных геотермальных солей Li посредством интеграции нескольких мультиспектральных и SAR-продуктов для создания карт разломов и растительности. Геологическое картирование осуществляется в два этапа: первый состоит из геологического картирования с использованием снимков Landsat-8 и Sentinel-2 с последующей интеграцией геофизических данных; и второй - сосредоточен на картировании изменений минералов с использованием мультиспектральных (ASTER и Worldview-3) и гиперспектральных данных. В свою очередь, данные SAR, а именно Sentinel-1, используются для детального отображения систем разломов, которые структурно контролируют солевые растворы Li. Второй - заключается в обнаружении растительности с возможными аномалиями Li.

Другим типом месторождений, которые могут иметь большой потенциал для использования ДДЗ, являются месторождения Li, в метаосадках, такие как Вальдефлорес (Касерес, Испания), где минерализация Li формируется в слюдах, в результате площадного метасоматоза площадью приблизительно 250×500 м. Это означает, что пространственное разрешение датчиков больше не будет проблемой, как на месторождениях пегматитов. Кроме того, метасоматические образования белых слюд обычно сопровождаются изменениями длин волн поглощения 2200 нм, которые можно использовать для определения минерализации с помощью гиперспектральных датчиков. Аналогичный подход может быть применен для обнаружения слюд Li в метаосадочных породах.

Для анализа публикаций по теме использовалось программное обеспечение VOSviewer для сетевой визуализации данных с помощью карт кластерной плотности. В таблице 1 и на рисунке 1 представлена информация о девяти публикациях, включенных в анализ.

Табл. 1. Публикации, связанные с поисками лития с использованием ДДЗ.

Authors (Year)	Title	Citations
Cardoso-Fernandes et al. (2019)	Constraints and potentials of remote sensing data/techniques applied to lithium (Li) pegmatites	-
Cardoso-Fernandes et al. (2019)	Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites	6
Santos et al. (2019)	Remote sensing techniques to detect areas with potential for lithium exploration in Minas Gerais, Brazil	-
Cardoso-Fernandes et al. (2019)	Evaluating the performance of support vector machines (SVMs) and random forest (RF) in Li pegmatite mapping: Preliminary results	-
Rossi et al. (2018)	An earth observation framework for the lithium exploration	-
Cardoso-Fernandes et al. (2018)	Potential of Sentinel-2 data in the detection of lithium (Li)-bearing pegmatites: A study case	4
Gemusse et al. (2018)	Pegmatite spectral behavior considering ASTER and Landsat 8 OLI data in Naipa and Muiane mines (Alto Ligonha, Mozambique)	1
Dai et al. (2017)	Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of Western Sichuan Province	1
Lefevre (1982)	Remote sensing of geobotanical anomalies in mineral exploration: a Landsat 1 processing methodology - Echassieres, Allier, France	-

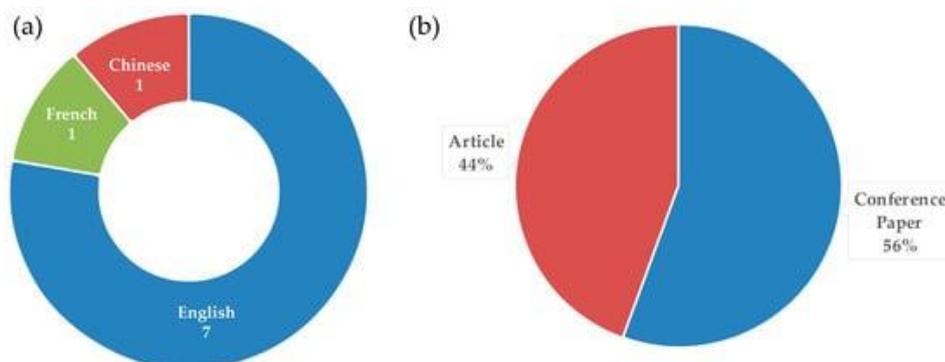


Рис. 1. Диаграммы языка и типа публикаций.

Большинство исследований было проведено европейскими исследователями (рис. 2а), а большинство областей исследований расположены также в Европе, плюс на американском, африканском и азиатском континентах (рис. 2б).

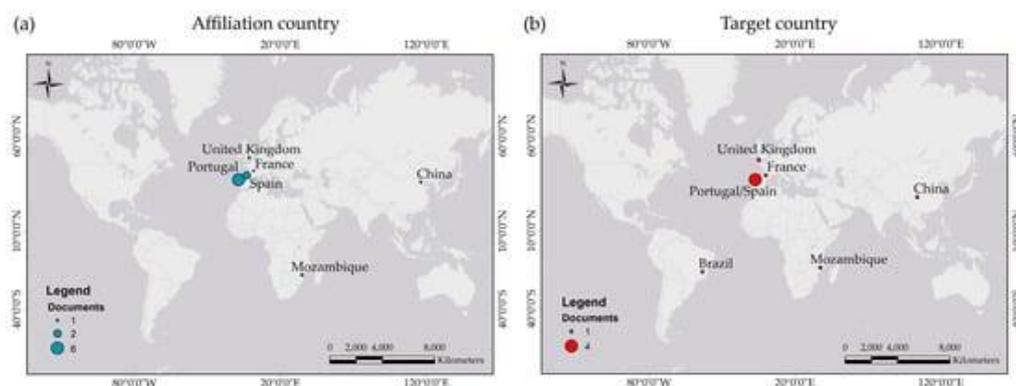


Рис. 2 Географическое распределение публикаций с учетом страны (а) и области исследования (б)

2.3 Основные проблемы.

Трудности, с которыми сталкиваются в ранее упомянутых исследованиях, в основном связаны с присущими Li-месторождениям характеристиками, особенно в случае Li-пегматитов, для которых характерны низкие площади экспозиции из-за их небольших размеров.

Сообщается о трудностях прямого применения спектральных характеристик Li-содержащих минералов, полученных в лаборатории, для идентификации похожих целей на изображениях ASTER. Эта проблема объясняется: (1) низким пространственным разрешением изображений по сравнению с целевой областью; (2) спектральным шумом, возникающим в результате смешения материалов, представленных в пикселях; и (3) низким спектральным разрешением датчика ASTER по сравнению с лабораторным спектрометриком.

Подчеркивается, что основная проблема, связанная с идентификацией гидротермальных изменений, заключается в том, что применяемые комбинации RGB, соотношения полос и подмножества, используемые для селективного PCA, соответствуют алгоритмам других типов месторождений с различными типами изменений и минеральными ассоциациями. Таким образом, для оптимизации картирования изменений, связанных с Li пегматитами, фундаментальное значение имеют характеристики возможных ореолов изменений во вмещающих породах. Знания об измененных ореолах позволили бы направить методы обработки изображений на конкретные минералы, и это могло бы помочь различать бесплодные и Li-минерализованные пегматиты. Кроме того, возможное распознавание ореолов

изменений со спутниковых датчиков позволило бы также увеличить площадь целевого участка, что позволило бы преодолеть проблему малой мощности пегматитов.

На основе работ, проведенных в районе Фрегенеда-Альмендра была предпринята попытка определить основные ограничения при разведке Li-пегматита с использованием ДДЗ, а именно: (1) растительный покров, который маскирует целевые спектральные характеристики; (2) малая мощность пегматита (проблема экспозиции); (3) небольшое количество полос и/или отсутствие тепловых полос в некоторых спутниковых датчиках (проблема спектрального разрешения); и (4) спектральные шумы, связанные с урбанизированными или сельскохозяйственными районами. Эти проблемы свойственны и другим типам литиевой минерализации.

В том, что касается маскирующего фактора растительного покрова, - предпочтительнее не смешивать спектральные характеристики как зеленой, так и сухой растительности, применяя методику скорректированной глубина континуума гиперспектральных датчиков, с поправкой на растительность.

Компромисс между пространственным и спектральным разрешением является основной проблемой при поисках Li-пегматита. Частично она решается исправлением классификаций изображений Sentinel-2 с использованием MLAs. Эти классификации включают спектральное смещение между Li-пегматитами и метаосадочными вмещающими породами. Кроме того, относительно большое количество классов, определенных на изображении для процесса классификации, способствует более высокой сложности данных, что, возможно, препятствует получению положительных результатов. Сокращение числа классов, не заинтересованных в диагностики Li, за счет использования маскировки безусловно, поможет оптимизировать производительность алгоритма.

Еще одна серьезная проблема для разведки Li на основе спутниковых данных заключается в том, что, несмотря на множество диагностических спектральных характеристик минералов Li, до сих пор не удалось идентифицировать уникальную спектральную особенность, обусловленную исключительно присутствием Li в структуре минералов.

Принимая все это во внимание, предстоит сделать еще много доработок в области дистанционного зондирования применительно к Li-минерализации, а также разработать новые алгоритмы и методологии.

2.4 Перспективы на будущее.

2.4.1. Аппаратура ДДЗ.

ASTER - это прибор для получения изображений на борту спутника Terra, флагманского спутника системы наблюдения Земли НАСА (EOS), запущенного в декабре 1999 года. ASTER собирает данные со средне-высоким спектральным разрешением в 14 диапазонах, пространственное разрешение которых зависит от длины волны: 15 м в VNIR, 30 м в SWIR и 90 м в TIR. ASTER также предоставляет возможность стереовидения для создания цифровой модели рельефа. Временное разрешение составляет 16 дней. Специфические характеристики ASTER в значительной степени способствовали разведке полезных ископаемых, особенно при составлении карт изменений, связанных с месторождениями золота и порфировой меди.

Программа Landsat представляет собой самую длинную в мире непрерывно собираемую коллекцию космических мультиспектральных ДДЗ среднего разрешения. До сих пор Landsat насчитывает семь успешных и одну неудачную миссию. Последняя миссия соответствует Landsat-9, который был запущен в декабре 2020 года. Landsat-9 оснащен двумя различными приборами: (1) оперативный наземный тепловизор (OLI); и (2) тепловой инфракрасный датчик (TIRS). Каждый продукт изображения содержит девять спектральных полос с пространственным разрешением 30 м для полос 1-7 и 9 и 15 м для полосы 8 (панхроматической); и две тепловые полосы (10 и 11) собраны на расстоянии 100 м, но передискретизированы для 30 м. Каждая полоса состоит из 16-битного изображения в оттенках серого. Размер сцены составляет 170×185 км. Временное разрешение составляет 16 дней.

Миссия Sentinel-2 включает в себя недавние спутники-близнецы Sentinel-2A и Sentinel-2B, запущенные в рамках программы Европейского союза Copernicus. Поскольку спутники не совпадают по фазе друг с другом, временное разрешение составляет пять дней на экваторе. Оба спутника получают информацию в 13 спектральных диапазонах в областях VNIR-SWIR: четыре полосы с пространственным разрешением 10 м, шесть полос на 20 м и три полосы на 60 м. Ширина орбитальной полосы составляет 290 км. Сравнение диапазонов Landsat-8, Sentinel-2 и ASTER приведено в таблице 2.

Табл. 2. Характеристики датчиков для дистанционного зондирования месторождений Li.

Sensor Name	Spectral Region (μm)			Nr. of Bands	Spatial Resolution (m)		
	VNIR	SWIR	TIR		VNIR	SWIR	TIR
Landsat-8 OLI/TIRS	0.43–0.88	1.57–2.29	10.60–12.51	11	30	30	100
ASTER	0.52–0.86	1.60–2.43	8.13–10.95	14	15	30	90
Sentinel-2 MSI	A	0.42–0.94	1.52–2.38	12	10	20	-
	B	0.42–0.94	1.52–2.37				
WorldView-3	0.40–1.04	1.20–2.37	-	16	1.24	3.70	-

Отмечается важность миссии Sentinel-2 для обеспечения непрерывности данных. Изображения Sentinel-2 пригодны для геологического картирования, обнаружения разломов и др. Применены различные MLA, искусственную нейронную сеть (ANN), k-ближайшего соседа (k-NN), RF и SVM к изображениям Sentinel-2, чтобы выполнить литологическую классификацию в офиолитовом комплексе во Внутренней Монголии (Китай). Сравнили использование Sentinel-2, ASTER и Hyperion при составлении карт гидротермально-0метасоматических изменений, связанных с медно-порфировыми месторождениями. Показаны некоторые возможности и ограничения использования Sentinel-2 для идентификации Li-пегматита.

В целом, до сих пор не существует единого продукта, способного удовлетворить потребности геологического картирования и поисков, поэтому необходимо совместное использование мульти- и гиперспектральных спутниковых данных. В том числе для компромисса между пространственным и спектральным разрешением необходимо использовать данные таких спутников, как WorldView-3. Запущенный в 2014 году DigitalGlobe, World-View-3 представляет собой мультиспектральный датчик высокого разрешения, который измеряет отраженное излучение в восьми диапазонах VNIR (с пространственным разрешением 1,24 м) и восьми полосах SWIR (с разрешением 3,70 м) (рис. 3). WorldView-3 также имеет панхроматическую полосу с пространственным разрешением 0,31 м. Ширина полосы составляет 13,1 км. Несмотря на отсутствие TIR-датчика, WorldView-3 обладает хорошим поисковым потенциалом, поскольку его полосы пропускания очень похожи на полосы ASTER VNIR-SWIR. Кроме того, такое высокое разрешение может помочь в решении проблем с растительностью.

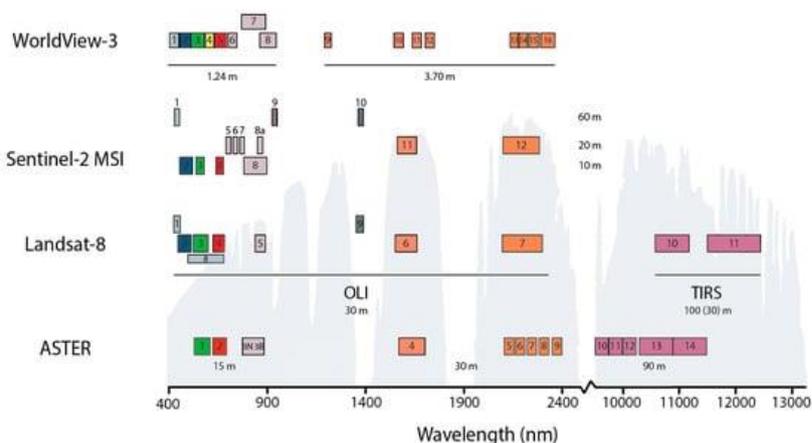


Рис. 3 Сравнение диапазонов ASTER, Landsat 8, Sentinel-2 и WorldView-3. ASTER: 1 зеленый; 2 красных; 3N / 3B—NIR nadir-looking / NIR backward-looking; 4-9 SWIR; 10-14 TIR. Landsat-8: 1 прибрежный аэрозоль; 2 синих; 3 зеленых; 4 красных; 5 NIR; 6 SWIR 1; 7 SWIR 2; 8 панхроматических; 9 перистых; 10 TIRS 1; 11 TIRS 2. Sentinel-2: 1 прибрежный аэрозоль; 2 синих; 3зеленый; 4 красный; 5, 6, 7 и 9 красный край растительности; 8 NIR; 10 cirrus; 11 и 12 SWIR. WorldView-3: 1 прибрежный; 2 синий; 3 зеленый; 4 желтый; 5 красный; 6 красный край; 7 NIR 1; 8 NIR 2; 9-16 SWIR.

Для преодоления остающихся трудностей, присущих исследованию Li, следует рассмотреть другие типы платформ дистанционного зондирования. В настоящее время гиперспектральные датчики, переносимые беспилотниками, стали реальностью. Фактически, такой подход используется для быстрого определения целевых областей для разведки Li в рамках проекта “Облегченное интегрированное наземное и воздушное гиперспектральное топологическое решение” (LIGHTS). У такого рода данных есть одно ограничение из-за высокой стоимости установки оборудования на беспилотнике, которая составляет около 200 000 долларов США. Тем не менее, такой подход будет востребован в ближайшем будущем, когда цены на дроны и гиперспектральные камеры снизятся.

2.4.2 Алгоритмы обработки изображений.

Определены три категории различных методов, алгоритмов обработки изображений и функциональных схем категоризации: (1) восстановление изображения; (2) улучшение изображения; и (3) извлечение информации; а также (4) подходы, основанные на знаниях, и подходы, основанные на данных.

Распространенными алгоритмами обработки изображений, используемыми при поисках, являются: (1) комбинации RGB; (2) соотношение полос; (3) PCA; (4) MNF; (5) согласованная фильтрация (MF); (6) линейное спектральное разделение (LSU); (7) минимизация ограниченной энергии (CEM); (8) метод наименьших квадратов; (9) независимый компонентный анализ и контролируемые алгоритмы, такие как (10) SAM и (11) MTNF.

Такие методы, как MNF, PPI и SAM, уже применялись для обнаружения Li-пегматита в Южной Намибии с использованием гиперспектральных данных с воздуха

(HyMap). Для того же региона был предложен новый метод классификации, названный MSAM с непрерывным удалением, который объединил модифицированный Spectral Angle Mapper (MSAM) и методы непрерывного удаления. Используя изображения HyMap, были созданы карты индексов для определения пегматитовых минералов, таких как лепидолит и другие белые слюды. В регионе Корнуолл (Великобритания) был использован лепидолит в качестве ориентира для топазсодержащих гранитов.

В последнее время большое внимание уделяется непараметрическим классификаторам, таким как алгоритмы машинного и глубокого обучения. Было установлено что ансамблевые классификаторы ANN и SVM, являются методами со значительно большей производительностью при литологическом картировании и поисках полезных ископаемых.

Был разработан автоматизированный подход к литологическому картированию на северо-западе Индии, в котором различные SVM с ядром радиальной базисной функции (RBF) были обучены с использованием ASTER, цифровой модели рельефа (DEM), полученной на основе ASTER, и аэромагнитных данных. Проверенное количество входных признаков варьировалось от 14 до 33, при этом точность классификации увеличивалась с увеличением количества слоев. По сравнению с классическим классификатором, SVM явно превзошел ML, достигнув гораздо более высокой точности.

В Тасмании был применен RF и самоорганизующиеся карты (SOM) для картирования литологии и вулканических изменений массивных сульфидов (VHMS). Исходные данные включали аэрогеофизические, почвенные геохимические и спектральные данные Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Этот подход предоставил новые геологические детали и определил перспективные площади развития изменений VHMS. Комбинация контролируемых и неконтролируемых MLA обеспечила надежное средство для анализа сложных ландшафтов.

В Индии сравнили эффективность RF и SVM при составлении литологических карт с использованием данных Landsat-8, ASTER и DEM. Изображения, полученные в результате анализа лабораторных спектров, использовались в качестве входных данных для системы нечеткого вывода (FIS) для дальнейшего различения амфиболита и слюдяного сланца. В целом, RF и SVM обеспечили более высокую точность.

В Иране сравнили SVM и ANN в гиперспектральном картировании офиолитовых ландшафтов с использованием изображений Hyperion. ANN достигла более высокой точности.

На северо-западе Канады была оценена производительность сверточных нейронных сетей (CNN) при составлении литологических карт. Для обучения сети использовались различные уровни данных, включая данные Landsat TM / ETM +, аэрофотоснимки и данные DEM с высоким разрешением. Эффективность CNN оценивалась в двух сценариях отбора проб: в первом использовались образцы, собранные на территории в независимой испытательной зоне; во-втором, производительность CNN сравнивалась с той, которая была достигнута с использованием RF-алгоритма. Оба алгоритма показали аналогичные результаты со средней точностью около 76%. Однако в независимых тестовых наборах CNN превзошел RF на 4%.

Большинство проведенных исследований показывают, что точность классификации повышается, когда несколько классификаторов могут быть объединены для формирования лучшего прогноза (с использованием методов ансамбля, таких как AdaBoost или bagging). Такой подход может помочь преодолеть недостатки отдельных классификаторов.

Несмотря на высокие результаты, достигнутые MLAS в области компьютерной обработки изображений, существуют некоторые трудности в том, что касается их применения для разведки Li. Первым и наиболее очевидным препятствием являются знания о MLA и DL, необходимые геологу для проведения такого подхода. Второе связано с характером проблемы классификации, поскольку поиски полезных ископаемых в целом и Li в частности, по своей сути отличаются от классических задач, таких как LULC. Наконец, объем обучения, связанный с каждым алгоритмом, и необходимость параметризации алгоритмов являются еще одним серьезным препятствием. Эта параметризация может быть более сложной в некоторых MLA, таких как SVM, но в целом исследования показывают, что параметры, как правило, чувствительны к регистру и, следовательно, фундаментальны. Необходимы новые разработки в области переноса знаний из одного тематического исследования в другое, и они, безусловно, повысят важность использования MLA и DL при поисках. С другой стороны, существует множество потенциальных возможностей, которые постоянно увеличиваются с предлагаемыми новыми моделями и алгоритмами. К ним относятся адаптации оригинальных алгоритмов (например, наклонная классификация RF или трансдуктивный SVM) и использование нетрадиционных алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы и оптимизация роя частиц с MLAs. Применение MLA для классификации субпикселей также может помочь уменьшить влияние смешанных пикселей на изображениях со средним пространственным разрешением.

2.5. Выводы.

1. В целом, для картирования признаков литиевой минерализации используются различные типы спутниковых продуктов с различными характеристиками, а также различные алгоритмы обработки изображений, начиная от простых логических или математических операций (соотношения полос) до более сложных алгоритмов, таких как MLAs.

2. Можно идентифицировать спектральные особенности пегматитовых полей и отличать Li-содержащие пегматиты от вмещающих пород (несмотря на ошибки классификации в литологическом картографическом подходе). В зависимости от типа вмещающей породы такая дискриминация невозможна без использования данных TIR. Предложенные подходы к прямой идентификации Li минералов/Li пегматитов были использованы во многих районах мира. В какой-то степени метод картирования гидротермально-метасоматических изменений пород работает для определения Li-пегматитов, хотя он наиболее перспективен в районах с благоприятной ландшафтно-геоморфологической обстановкой.

3. Картирование Li-пегматитов и сопровождающих изменений существенно затруднены в зависимости от их параметров и применяемого метода обработки изображений, что указывает на отсутствие автоматизированного определения Li-минерализации. Другие трудности связаны со спектральными шумами в ландшафтно неблагоприятных, урбанизированных или сельскохозяйственных районах. Эти проблемы в том числе вызваны и недостаточным спектральным и пространственным разрешением ДДЗ. В настоящее время нет существующего или ожидаемого спутникового продукта, способного устранить эти трудности. Тем не менее, несмотря на отсутствие тепловых полос, WorldView-3, вероятно, является самым доступным продуктом, способным справиться с компромиссом пространственного и спектрального разрешения. Кроме того, высокое пространственное разрешение WorldView-3 может помочь справиться с трудностями, связанными с растительностью, в том числе спектральным разделением зеленой и сухой растительности. Для оптимизации составления карт изменений, детальной геологической характеристики минералов изменений и возможных ореолов изменений во вмещающих породах может привести разработка конкретных, более эффективных алгоритмов. Другие типы данных дистанционного зондирования, а именно гиперспектральные датчики, переносимые беспилотниками, несомненно могут стать более эффективным инструментом исследования минерализации Li.

4. В будущем предстоит сделать несколько разработок в области дистанционного зондирования применительно к минерализации Li. Постоянное увеличение и развитие MLAs открывает дальнейшие возможности для совершенствования поисковых технологий. Менее распространенные методы, такие как адаптация оригинальных MLAs или объединение нескольких классификаторов в один прогноз, могут помочь добиться лучшей производительности. Интеграция ДДЗ с новой геологической информацией несомненно повысит поисковый потенциал. Развитие и совершенствование геоботанического подхода может позволить проведение поисков минерализации лития с использованием дистанционного зондирования в районах с высокой растительностью, что на сегодняшний момент невозможно. Обобщение упомянутых подходов на другие типы (например, рассолы) также будет способствовать созданию комплекса методов дистанционного зондирования в качестве фундаментального инструмента при поисках месторождений Li.

3. ГРР НАЧАЛЬНОЙ ПОИСКОВОЙ СТАДИИ НА СКРЫТОМ ОБЪЕКТЕ [1]. (Северо-Западные Территории, Канада)

3.1 Региональная геология.

Проект 939 StrategX Elements Corporation расположен в центральном регионе Северо-Западных Территорий, Канада, к северу от восточного рукава Большого Невольничьего озера. Поисковый объект практически полностью скрыт под ледниковыми и современными озерными отложениями.

Геологически проект 939 расположен на северо-западе Канадского щита в провинции Невольничий, которая простирается от залива Коронейшн на севере до северного берега Невольничьего озера на юге. Провинция представляет собой северо-западный регион древнего ядра Северной Америки (Лаврентия) и ограничен магматической зоной Телон (2020–1910 млн лет) на востоке, аккреционным образованием Вупмей (1,88–1,74 млрд лет) на западе, покрытым породами палеопротерозойской супергруппы (ок. 1,97–1,89 млрд лет) на северо-западе, перекрытый палеопротерозойскими вулканогенно-осадочными породами Восточно-Армейской впадины на юге и ограниченный разломом Макдональд на юго-востоке (рис. 1).

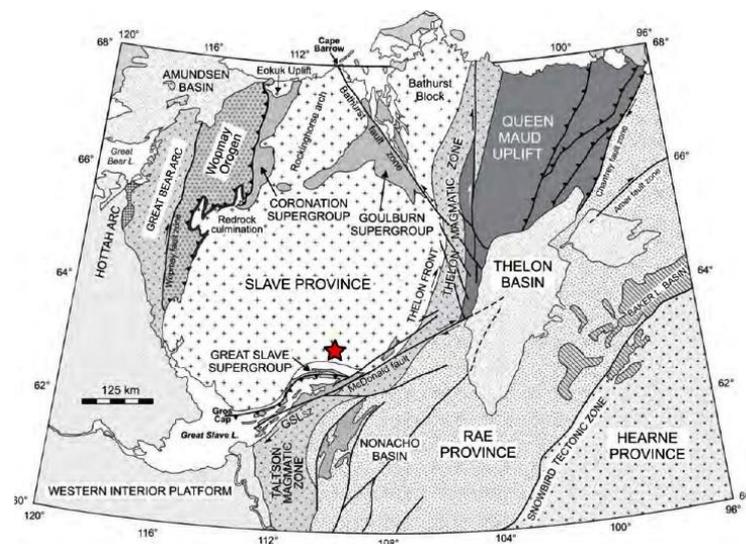


Рис. 1. Тектоническая обстановка провинции Слейв с окружающими тектоническими регионами. Красный звездочка обозначает местоположение проекта 939

Провинция Слейв представляет собой непрерывное обнажение террейна архейского (приблизительно 4,05–2,55 млрд лет) гранитно-зеленокаменного типа, ограниченного протерозойскими орогенами на востоке и западе. Считается, что Слейв является остатками древнего суперконтинента, известного как Кенорленд, или суперкратона, известного как Склавия, который был кратонизирован между 2,58–2,51 млрд лет назад. Пять тектонических областей, ориентированных с севера на юг,

покрывают Слейв: террейн реки Снэр, супертеррейн Центральный Слейв, террейн Контвойто, террейн реки Хакетт и блок Батерст. Проект 939 расположен в южной части террейна Контвойто, который преимущественно состоит из архейских гранитоидов и архейских метавулканических/метосадочных пород (турбидиты, мигматизированные турбидиты, местами переслаивающимися с вулканитами/вулканокластами) супергруппы Йеллоунайф. Террейн Контвойто считается аккреционной призмой, образованной между фундаментом Центрального Слейвского супертеррейна на западе и вулканическими дугами на востоке с замыканием направленных на запад зон субдукции на восточной и западной окраинах. Contwoyto был скрыт под мезоархейскими породами фундамента Центрального Слейвского супертеррейна в неоархее.

Региональная деформация и синтектонический плутонизм произошли после отложения турбидитных толщ супергруппы Йеллоунайф. Турбидитные толщи подвержены многочисленным эпизодам деформации в результате регионального сжатия и внедрения плутона. Пост-коллизийные структуры являются наиболее хорошо сохранившимися и наиболее узнаваемыми. Описана структура к северо-востоку от объекта 939 с тремя основными структурными деформациями (D1-D3) и связанными метаморфическими событиями (M1-D3 M3):

1) Раннее прогрессирующее утолщение земной коры (D1–M1 и D2–M2) характеризовалось развитием вертикальных изоклиналиных складок и связанных с ними пиковых термических условий.

2) В нижней тектонотермальной области формировались прилегающие к изоклиналиным лежачим складкам и связанным с ними субгоризонтальным движениям (D3–M3), сопровождавшимися обширным анатексисом земной коры.

3) Верхний и нижний тектонотермальные домены были структурно разделены во время D3 (рис. 2).

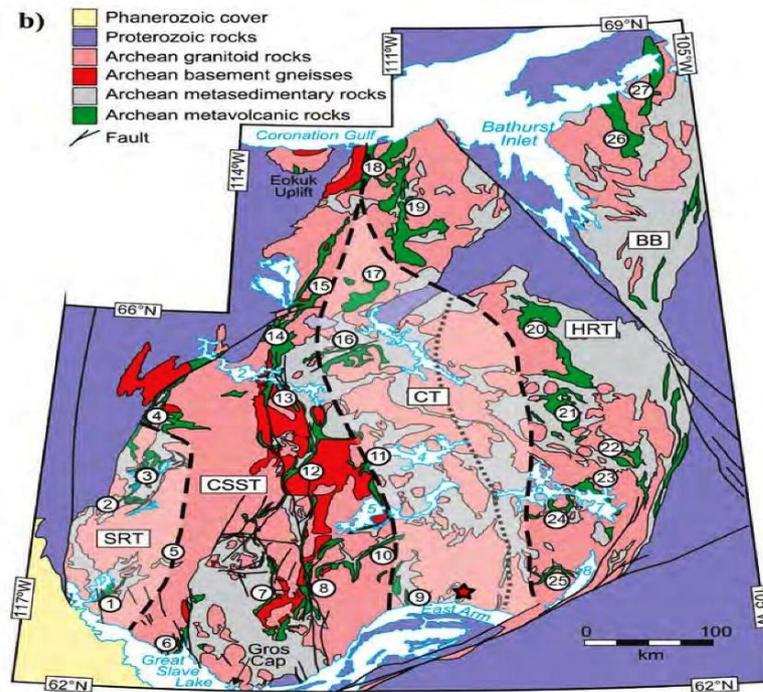


Рис. 2. Геологическая карта террейна Слейв Сокращения: BB – Bathurst Block. Границы террейнов обозначены жирными пунктирными линиями; CSST — супертеррейн Central Slave; КТ – террейн Контвойто; HRT – террейн реки Хакетт; SRT - Снэр Ривертерран. Граница между CSST и СТ соответствует изотопной границе Pb. Пунктирный черная линия на КТ представляет изотопную границу Nd. Номера в черных кружках - озера.

3.2 Геология объекта.

Объект 939 находится в пределах супергруппы Йеллоунайф (30-километрового комплекса горных пород с северо-востока на юго-запад к северу от залива Маклеод Большого Невольничьего озера), состоящей из частично расплавленных мигматитов с лейкосомами и реститовыми шлирами и инъекцией гнейсов от псаммитовой до пелитовой структурами, представляющих собой преимущественное расслоение параллельных инъекций гранитного расплава. Пакеты супергруппы Йеллоунайф содержат монцограниты (2,61–2,58 млрд лет), описанные как порфиоровые или субпорфиоровые, калиевые богатые полевым шпатом, среднезернистые или крупнозернистые, с выветриванием от светло-красного до розоватого, с около 10% биотита и мусковита, рассечены пегматитовыми дайками. Мигматиты прорываются роговообманковым биотитовым тоналитом (2,63-2,61 млрд лет) с буро-серым выветриванием, равнозернистой, среднезернистой текстурой, от идиоморфного до субидиоморфного плагиоклаза с кварцем, биотитом, роговой обманкой и незначительным количеством калиевого полевого шпата (рис. 3).

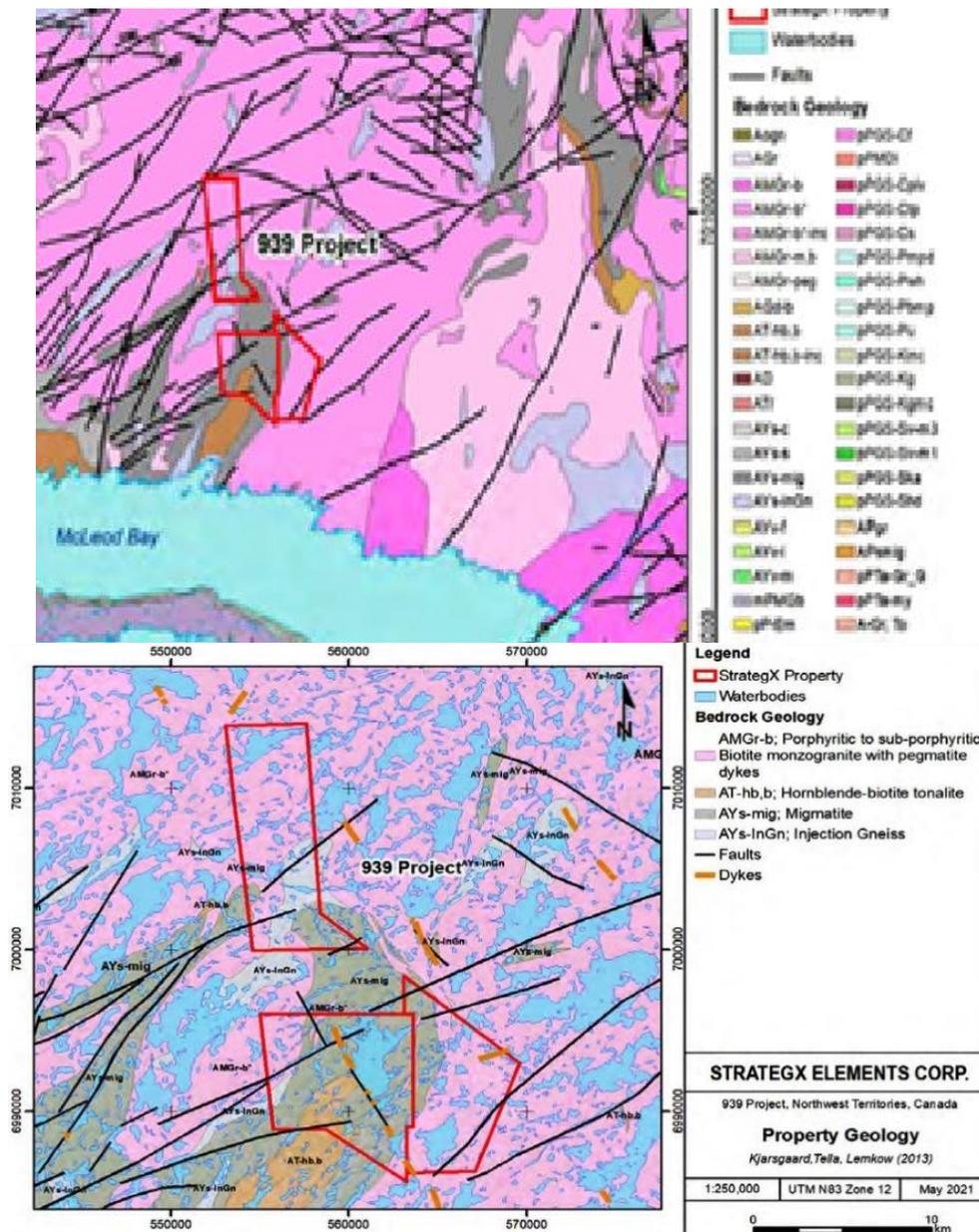


Рис. 3 Геология объекта 939.

Западная часть территории состоит из смешанных осадочных и промежуточных туфогенных пород супергруппы Йеллоунайф. Следы незначительного количества пирротина окислились с образованием зоны, связанной с усиленной кварцевой прожилковостью. Восточная часть проекта представлена гранитами архейского возраста, тоналитами и биотитовыми монцогранитами. Порода включает до 70% калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Кварц и роговая обманка составляют примерно 20% и 10% соответственно. Кварц стекловидный и интерстициальный. Метавулканы представляют собой сильно расслоенные породы с хлоритом, амфиболитом, с прожилками карбоната, белого кварца и локальными прослоями

светло-зеленых серицитизированных туфов. Может проявляться интенсивное окварцевание, гематитизация и стручки с субидиоморфным пиритом.

3.3 Минерализация, ожидаемые типы месторождений.

В связи с ранней поисковой стадией проекта 939, для объяснения выявленных ранее кобальтовых аномалий предложено два типа месторождений - IOCG (железо-оксид-медь-золото) и пятиэлементные (Ni-Co-As-Ag-Bi±U) гидротермальные жильные месторождения.

М-ния IOCG представляют собой группу структурно контролируемых магмо-гидротермальных месторождений, часто с начальными натриевыми или натриево-кальциевыми фазами изменений. Они часто формируются в докембрийских межкратонных обстановках, содержат медь, драгоценные и др. металлы, связанные с оксидами железа (гематит, магнетит). Содержания в большинстве месторождений IOCG от умеренных до низких (за исключением гигантских месторождений, таких как Олимпийская плотина в Австралии) и могут содержать экономические количества различных элементов (Fe, Cu, Pb, Zn, Co, Bi, Mo, V, U, Th и редкоземельные элементы). Стили оруденения в месторождениях IOCG разнообразны и могут состоять из связанных дискордантных зон брекчий, жил, замещений, вкраплений, манто и скарнов и тп..

Пятиэлементные м-ния (также называемые жилами Ni-Co-Native Ag) представляют собой гидротермальные трещинные жилы, состоящие из кварца, кальцита, арсенидов, сульфидов, уранинита, а иногда барита и флюорита. Обычно они отлагаются в осадочных или кристаллических породах (плутонических и метаморфических) с небольшим количеством прослоев вулканитов или без них, внутри или рядом с диабазовыми дайками. Пятиэлементные жилы в основном производят экономически выгодные количества Ag и иногда Ba, Co, Pb, Zn, Cu и U. Изменения на краях пятиэлементных жил обычно представлены незначительными пропиловыми изменениями (хлорит-эпидот-кальцит), простирающимися часто только на 10 см или менее от края жилы. Пятиэлементные жилы известны во многих районах, преимущественно в Европе и Северной Америке. Рудный район Восточного рукава, наиболее схожий с объектом 939 находится в Кобальте, Онтарио, где узкие серебряно-кобальтово-кальцитовые жилы залегают в отложениях серии Кобальт. Отмечено, что прожилки кобальта встречаются внутри и рядом с диабазовыми силлами.

Аномалии кобальта были выявлены в поверхностных валунах по краям Туманного озера с содержанием Co от 166 до 360 ppm и состояли из карбонатизированных и

ожелезненных метаосадочных пород с тонкой вкрапленной пиритной минерализацией, заключенной в кварцевых прожилках. На Рисунке 4 показано положение проекта и известные месторождения полезных ископаемых в этом районе.

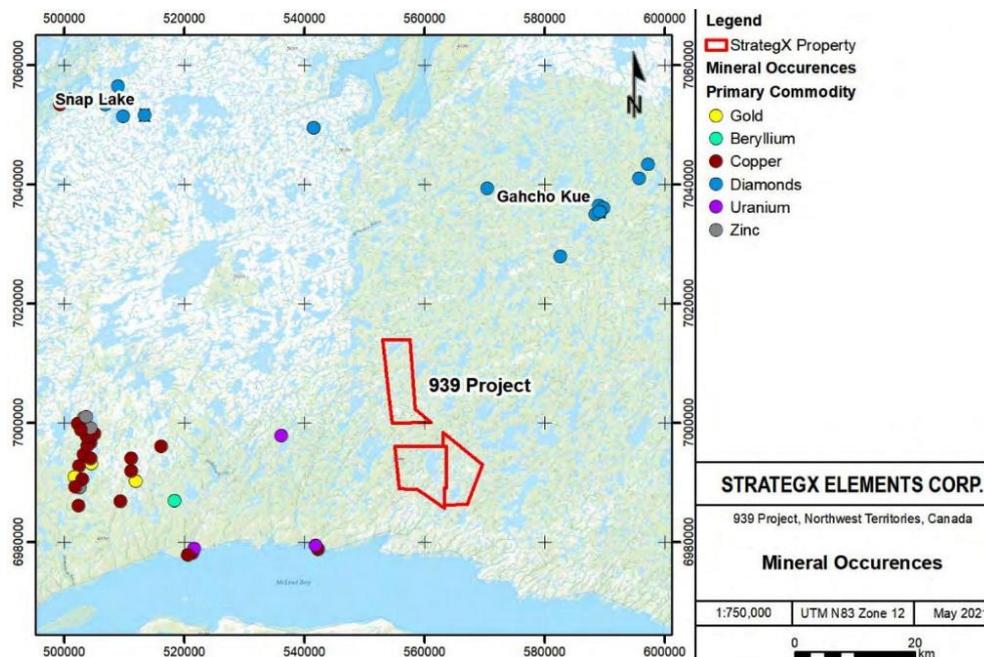


Рис. 4 М-ния ПИ в районе объекта 939

3.4 Выполненные ГРР.

С весны 2018 г. по апрель 2021 г. компания StrategX провела рекогносцировочное геологическое картирование, отбор проб и геофизические исследования на объекте 939, в основном сосредоточенном в Мисти-Лейк и вокруг него (табл. 1, рис. 5).

В течение 2018 года StrategX собрала 50 проб тилла, весом примерно от 1 до 5 кг. Кроме того - 43 пробы скальных пород и 6 проб озерных отложений.

В 2019 году в качестве основного инструмента поисков использовался отбор проб озерных отложений. Была отобрана 121 проба. Также были отобраны 25 проб скального грунта. В целом отбор проб был сосредоточен в долине, простирающейся на северо-восток, что соответствует линейной магнитной аномалии шириной 30-50 м и длиной 7000 м.

Табл. 1 Резюме исторических исследований

Компания	Исследования	Результаты
Геологическая служба Канады («ГСК»)	Отбор проб озерных отложений	223 ppm Co в образцах Туманного озера
Ресурсы Южной эры Inc.	Отбор проб тилла	Минералы-индикаторы кимберлита отсутствуют
Основные общие ресурсы Inc.	Аэромагнитная съемка с интервалом 100 м	Магнитная аномалия
Kennecott Exploration Inc. («КЦИ»)	Отбор проб озерных отложений	КЦИ очертил область 6 x 3 км. (до 400 ppm Co).

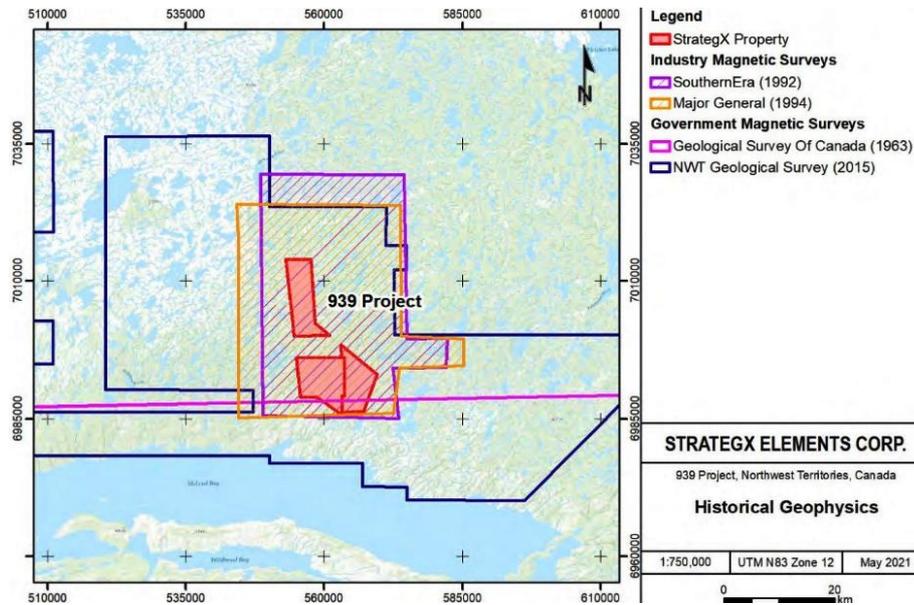


Рис. 5 Сводка исторических аэрогеофизических исследований

ГРП, проведенные StrategX в 2021 году, включали: (1) наземная магниторазведка; (2) наземное электромагнитное IP с подвижной петлей; (3) экспериментальная томография Aurora Rapid Reactance Tomography («ARRT»), которая представляет собой IP-систему, буксируемую снегоходом; и (4) отбор проб озерных отложений.

На рисунке 6 обобщены результаты по кобальту на сегодняшний день на объекте 939. По всему объекту существует ряд высокоаномальных проб (до 1885 ppm Co), и компания StrategX определила высокоприоритетную аномалию отложений кобальтового озера северо-восточного простирания с 8 пробами, содержащими более 1095 ppm Co (до 4900 ppm Co). Эта цель с северо-восточным трендом получила название The Trench Target.

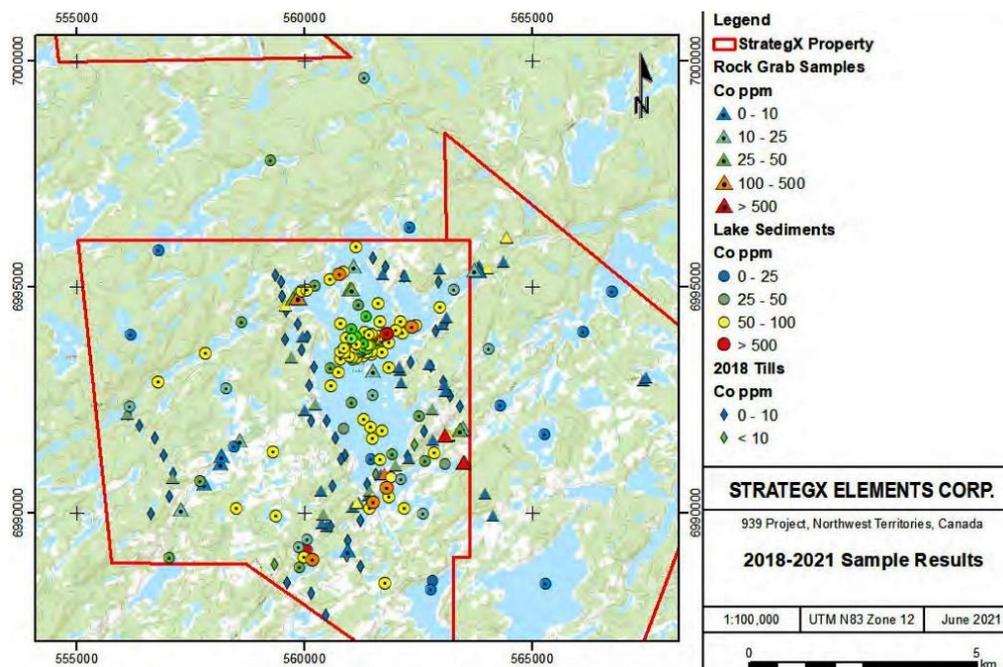


Рис. 6 Сводка результатов опробования

3.4.1 Параметры и процедуры геофизической программы.

Наземная магниторазведка выполнялась на снегоходе, буксировавшем магнитометр. Базовые станции были установлены в магнитно-спокойной зоне и во время съемки включались каждую секунду. Базовая станция и полевые магнитометры ежедневно перед съемкой синхронизировались со временем GPS. Суточная геомагнитная вариация была удалена путем линейной интерполяции и вычитания дрейфа базовой станции. Опрос был приостановлен, а данные опущены и измерялась повторно, если геомагнитная вариация превышала 50 нТл в течение 10 с на постоянной основе.

Была выполнена электромагнитная съемка с подвижной петлей («MLEM»). Съемка проводилась с использованием конфигурации подвижной петли с центральным зондированием по сетке. Измерение электромагнитного сигнала центральной петли во временной области производилось с позиции одной катушки, расположенной в центре квадратного передающего контура 100x100. Системы Geonics Protom использовались для электромагнитных зондирований во временной области и состояли из цифрового приемника Protom 57 и передатчика TEM57-МК2А. Каждый инструмент является портативным и управляется одним человеком. Снегоходы оснащены санями и съемка выполняется путем создания квадратных петель 100 x 100 м с использованием медного провода 10 AWG и подачи тока с помощью передатчика. Описанную выше процедуру выполняла бригада из 5 человек. Как правило, во время этого обследования 5 показаний с продолжительностью 30 секунд измеряются и складываются. Затем петлю перемещают на 100 м, и процесс повторяется.

Экспериментальная съемка по методу быстрой реактивной томографии «Аврора» («ARRT») была завершена путем буксировки системы сопротивления и заряда с емкостной связью за снегоходом по съемочной сетке (фото 1).



Фото 1 Проведение «ARRT».

Туманное озеро было сочтено приемлемой целью для испытаний устройства ARRT из-за большой и легкодоступной поверхности озера. Каждая линия на геодезической сетке считывалась один раз с использованием конфигурации диполь-дипольной системы с одним передатчиком и четырьмя приемниками с длиной диполя 20 м. Данные записывались непрерывно (рис. 8).

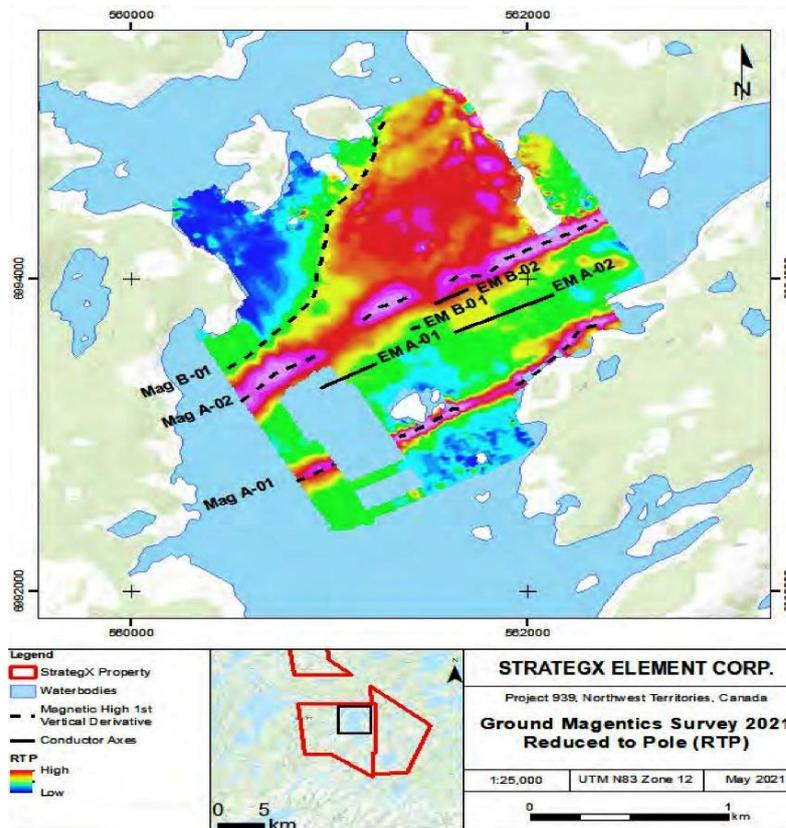


Рис. 8 Геофизическая съемка 2021 г. для объекта StrategX 939 Trench Target.

В период с 14 по 27 марта 2021 г. было выполнено 76,7 пог. км съемки МАГ. Площадь геофизических исследований составляла 2 x 2 км. Сетка была выложена в зоне 12N UTM WGS84 в виде серии путевых точек GPS, разнесенных на расстоянии 20 м друг от друга. Азимут линии составлял $151,55^\circ$, расстояние между линиями 50 м, линии начинались и заканчивались в соответствии с прямоугольной границей и/или границами водоемов. Длина варьировалась от 1 км до примерно 2,2 км. Исходные и связующие линии были ориентированы ЮЗ-СВ под углом $61,55^\circ$.

В тот же период было выполнено 180 зондирований MLEM. Площадь геофизических исследований составляла примерно 2 x 2 км. Сетка была размещена в зоне 12N UTM WGS84 и предоставлена в виде серии путевых точек GPS, разнесенных на 100 м друг от друга. Азимут линии составлял $151,55^\circ$, расстояние между ними 100 м, линии начинались и заканчивались в соответствии с прямоугольной границей и/или границами водоемов. Длина варьировалась от 800 м до примерно 1,6 км. Расстояние между станциями 100 метров.

Были также выполнены 20 пог. км изысканий ARRT. Площадь геофизических исследований также составляла 2x2 км. Сетка была размещена в зоне 12N UTM WGS84 и предоставлена в виде серии путевых точек GPS, разнесенных в 100 м друг от друга. Съёмочная сетка Туманного озера состоит из 12 параллельных линий средней длиной 1,7 км каждая, отстоящих друг от друга на 100 м и ориентированных под углом 151,55°.

3.4.2 Интерпретация геофизических данных.

Данные о магнитном поле, скорректированные посуточно, наносились на сетку для получения изображения полного магнитного поля в районе съёмки. Данные с координатной сеткой дополнительно обрабатывались путем применения фильтра уменьшения магнитного полюса («RTP») с использованием расширения 2D-фильтрации Geosoft МАГМАП. Фильтрация RTP использовалась для лучшего обнаружения магнитных откликов, которые смещены от местоположения их источника из-за наклона и склонения индуцирующего поля Земли. Затем сетка магнитного поля RTP продолжалась вверх до 20 м над поверхностью, чтобы уменьшить влияние любых небольших источников магнитного поля вблизи поверхности, и выделить тонкие линейные особенности, которые могут иметь северо-восточное направление параллельное зоне желоба. Результирующее изображение магнитного поля показано на рис. 8. Пробел в данных, возникший в квадранте ЮЗ, связан с неисправностью базового магнитометра во время сбора данных. Попытки повторно посетить этот район не увенчались успехом из-за погодных условий. Магнитное поле с уменьшенным полюсом в районе съёмки колеблется примерно на 180 нТл от 57999 нТл до 58170 нТл.

Две линейные положительные аномалии северо-восточного простирания, обозначенные как МАГ А-01 и А-02, простираются по центральному и южному краю области и интерпретируются как местоположения магнитных даек. Видны разрывы и деформация аномалии МАГ А-02 между линиями ЭМ-съёмки 3850 и 4150 и между линиями 4450 и 4550, что предполагает наличие возможных поперечных структур. Аномальные пробы озерных отложений на кобальт расположены ближе к этой части аномалии. Криволинейная особенность, обозначенная МАГ-В-01, разделяет более низкие и более высокие магнитные домены через северные пределы сетке ЭМ и может представлять собой геологический контакт.

Профили зондирования MLEM моделируются инверсией в 1D. Результатом моделей являются значения удельного сопротивления на глубине до 300 м под поверхностью для каждой станции. Эти модели объединены, подвергнуты кригингу и

представлены в виде срезов глубины. Смоделированное удельное сопротивление варьируется примерно от 1000 Ом-м до 30 000 Ом-м. По-видимому, нет корреляции между значениями удельного сопротивления, полученными при съемке MLEM, и высокими магнитными откликами, полученными из набора данных магнитометра.

Источников с сильной проводимостью в районе съемки не предполагается. Данные канала раннего времени MLEM проверяются на отклики, которые могут быть вызваны более слабыми проводниками. Временные каналы 1 и 2 изображены в виде профилей на рис. 8, перекрывающих изображение магнитного поля. Положительные скачки в каналах раннего времени были бы ожидаемой реакцией на источники с плохой проводимостью. Положения первых временных характеристик используются для наброска интерпретируемых осей «слабых» проводников. Оси обозначены EM A и EM B. Оси проводников EM A-01 и 02 простираются примерно под углом 60° и параллельны магнитной аномалии MAG A-02 и простираются на 200-250 м к югу. Оси проводников EM B-01 и 02 значительно короче и расположены в пределах 200 м.

Данные ARRT продолжают обрабатываться, а продукты и результаты ожидаются. Необработанные данные представляются полевым операторам в виде псевдоразрезов для определения качества данных. Этот предварительный вид позволяет провести начальную проверку данных и может использоваться для сопоставления ответов с известными геологическими, топографическими, батиметрическими или другими геофизическими данными.

3.4.3 Пробоотбор, аналитика.

На льду была предпринята попытка экспериментальной съемки озерных отложений. Первые попытки были предприняты с устройством для отбора проб Idaho Claw, которое с успехом использовалось на озере в летние месяцы. Вытягивание пробы через 3 фута льда не увенчалось успехом, и вместо этого образцы были собраны с помощью меньшей модели Lake Sampling Torpedo. Образцы в идеале брались из центральной части каждого озера и брались путем проделывания отверстия во льду зимой или с борта самолета «Хаски» с помощью поплавков, сбрасывая торпеду, прикрепленную к веревке, на дно озера и собирая пробу осадка весом 200 г.

Отобранные пробы были взяты из областей возможного морозного «вскипания» (было выявлено очень мало очевидных морозных вскипаний). Наиболее часто взятые образцы описываются как тонкий слой тилла, обнаруженный на террасах обнажений и оказавшийся очень песчаным. Отбор проб был довольно трудным, и взятые образцы, как правило, были довольно небольшими, весом от 1,00 до 2,10 кг, и в целом качество образцов было довольно низким.

Отбор проб озерных отложений проводился с использованием модели Лейк Сэмплинг Торпедо. Образцы были собраны с самолета Husky с неподвижным крылом. Самолет с поплавками сбрасывает торпеду, прикрепленную к тросу, на дно озера. и сбор 200-граммовой пробы осадка и упаковка всей пробы в пакеты.

Образцы тилла взвешены и зарегистрированы с использованием системы штрих-кода, просеяны SCR-41 до -180 мкм и обе фракции сохранены. Затем образцы были проанализированы с использованием ALS ME-MS41 Ultra Trace, царская водка ICP-MS для 71 элемента. Отобранные пробы были повторно проанализированы с использованием другого размера скрининга SCR-51 (-/+75um).

Пробы озерных отложений были взвешены и зарегистрированы с использованием системы штрих-кода, а затем просеяны до -180 мкм, и обе фракции были сохранены. Затем образцы были проанализированы с использованием ICP-MS ME-MS41 Ultra Trace Aqua Regia от ALS на 71 элемент.

Места отбора проб коренных пород весом примерно 1-2 кг были выбраны на основе аномальных участков гидротермальных изменений пород и/или наличия рудной минерализации, выявленных по историческим данным. Место отбора пробы было сфотографировано. Отдельные пробы скального грунта были весом около 15 кг. Образцы были доставлены в лабораторию ALS в Йеллоунайфе (Северо-Западная провинция) для геохимического анализа.

Каждый образец породы был высушен и измельчен в соответствии с кодом подготовки «PREP-31A», при этом образцы измельчались до тех пор, пока 70% материала образца не проходило через сито менее 2 мм. Из этого материала отбирали 250-граммовую пробу и затем измельчали до тех пор, пока 85% не пройдет через сито с размером ячеек 75 микрон. Отбирали 0,5 г каждого образца для многоэлементного анализа, а 50 г каждого образца отбирали для анализа на золото.

Пробы по 0,5 г каждого образца породы были проанализированы на 51 элемент с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (метод ME-MS41).

3.5 Результаты.

В целом, по результатам проведенных начальных ГРП, можно прогнозировать кобальтовое оруденение на объекте в пределах 2-километровой северо-восточной структуры (разлома?), определяемого геофизическими аномалиями и аномалиями содержания кобальта в озерных осадках. Эта потенциально рудная структура находится внутри озера, ее параметры в настоящее время неизвестны. Магнитная

аномалия продолжается примерно на 7 км. Аномалия кобальта в донных осадках имеет ширину до 200 м и имеет хорошую непрерывность вдоль совпадающей структуры северо-восточного простирания.

4. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПОИСКАХ МАРГАНЦА [2].

(массив Обан, Ю-В Нигерия)

4.1. Введение

Усилия федерального правительства Нигерии по оживлению крупнейшей в стране сталелитейной компании Ajaokuta направлены на выявление месторождений марганца в Обане. Марганец встречается во многих минералах, таких как сугилит, пурпурит, родонит, родохрозит, пиролюзит и псиломелан. Он имеет широкое экономическое применение, включая сталелитейную промышленность, химическое и др. машиностроение, производство специальных алюминиевых сплавов, керамическую промышленность, средства для очистки воды, сельское хозяйство (добавки к корму для скота, удобрения для растений), красители и аккумуляторы.

Залежи марганца в Нигерии распределены в основном в пределах северо-западного и юго-западного сланцевых поясов, включая пояса Мару-Анка, Бирнин-Гвари и Игарра-Джакура-Кабба (рис. 1).

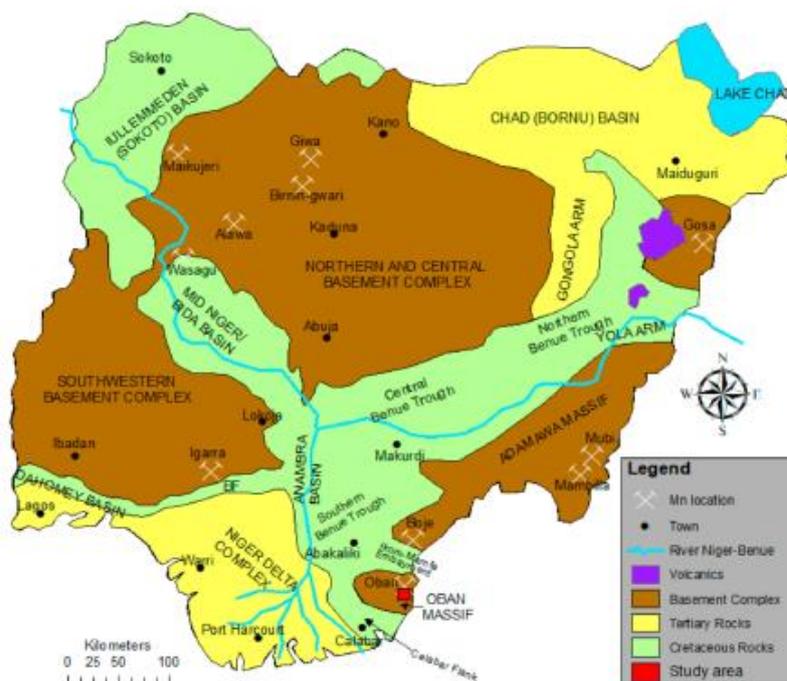


Рис. 1. Упрощенная геологическая карта Нигерии с месторождениями марганца.

Подтверждено, что в Нигерии имеется более 5 млн т марганцевых руд. Имеются сообщения об обнаружении марганца в породах фундамента в ЮВ районах Нигерии, соседнего Камеруна и в пределах массива Обан. Однако мало что известно о марганцевой минерализации в районе Обана в отношении степени, характера и типа минерализации. Для выявления этого ресурса необходимо правильное понимание геологии, структуры, генезиса и возможных параметров оруденения. С этой целью на части территории массива Обан были проведены геологические и геофизические

исследования, для выяснения взаимосвязи между структурами фундамента и залежами Mn и др. полезных ископаемых. В качестве геофизического метода была выбрана аэромагнитная съемка.

4.2 Геологические условия

Исследуемый район находится в юго-восточном нагорье и занимает площадь приблизительно 337 км² (рис. 2).

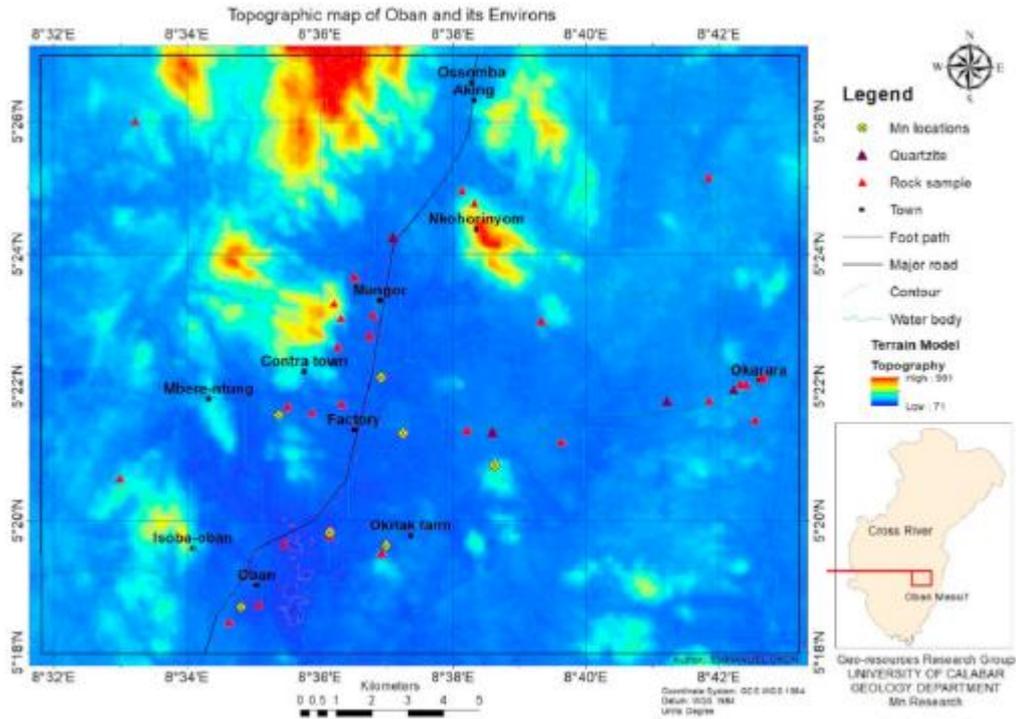


Рис. 2. Топографическая карта с указанием точек опробования.

В этом районе преобладают изолированные холмы с максимальной высотой около 1200 м над уровнем моря. Эти холмы часто рассечены V-образными долинами, и покрыты густой растительностью. Исследуемая территория хорошо дренирована, с сетью рек и связанных с ними ручьев.

Геологически исследуемый район находится в пределах массива Обан юго-восточного комплекса фундамента Нигерии и является частью панафриканского подвижного пояса. Он относится к докембрию и простирается от африканского континента до орогенных поясов, известных на северо-востоке Южной Америки. Он является частью нигерийского комплекса фундамента и состоит преимущественно из гнейсово-мигматитовых комплексов пород, в которые позже были внедрены древние (панафриканские) и более молодые (юрские) гранитоиды, а также основные и ультрамафитовые породы. Rb-Sr и K-Ar датировка абсолютного возраста показала, что породы фундамента являются полициклическими - эбурнейского (2000 ± 200 млн лет), кибаранского (1300-900 млн лет) и панафриканского (800-500 млн лет) этапов

орогенеза. Считалось, что архейские и протерозойские породы фундамента были ремобилизованы в течение неопротерозоя с ценной частью ювенильных материалов (рис. 3).

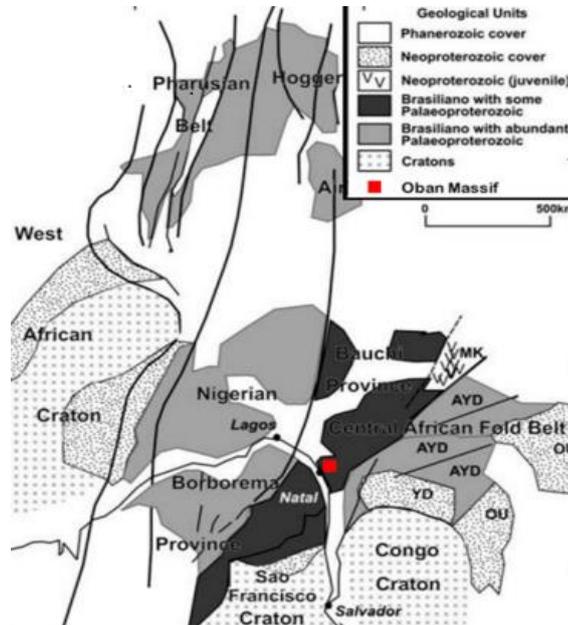


Рис. 3. Палеопротерозойские пояса до дрейфа между Африкой и СВ Южной Америки. АYD, домен Адамава-Ядэ; МК, местность Майо-Кеби; OU, складчатый пояс Oubanguide; ярд, Домен Яунде.

Орогенные пояса в Нигерии были разделены на восточный и западный блоки основным линейным элементом субмеридионального направления. Основной особенностью, характеризующей восточные участки пород докембрийского фундамента, являются высокоразвитые метаморфические породы, повсеместная мигматизация, гранитный плутонизм и металлогеническая специализация.

4.3 Материалы и методы

4.3.1 Сбор данных

Данные для этого исследования были получены из геологического картирования и аэромагнитной съемки в масштабе 1:100 000 канадской компанией Fugro-Airborne Surveys (FAS). Наземная полевая кампания включала литологическое картирование горных пород и характеристику наблюдаемых структурных особенностей с созданием роз-диаграмм и стереографических проекций. В ходе картографирования было также проведено опробование горных пород. Таким образом, структурные данные были сведены в таблицу для дальнейшего использования. Аэромагнитные данные были получены с разрешением на местности 0,08–0,1 км, межстрочным интервалом 0,5 км и межстрочным интервалом 0,1 км вдоль 826 000 линий с использованием системы ассимиляции данных Flux Adjusting Surface (FASDAS). Линии полета и стыковочные линии, соответственно, были выровнены с северо-запада на юго-восток и с северо-

востока на юго-запад. Направление линий было выбрано так, чтобы они пересекали весь геологический разрез. Магнитные данные, полученные и использованные в этом исследовании, были скорректированы и обработаны в общую карту магнитной интенсивности (рис. 4), которая была привязана к сетке, сохранена и показана в цветном растровом формате в Oasis Montaj Geosoft.

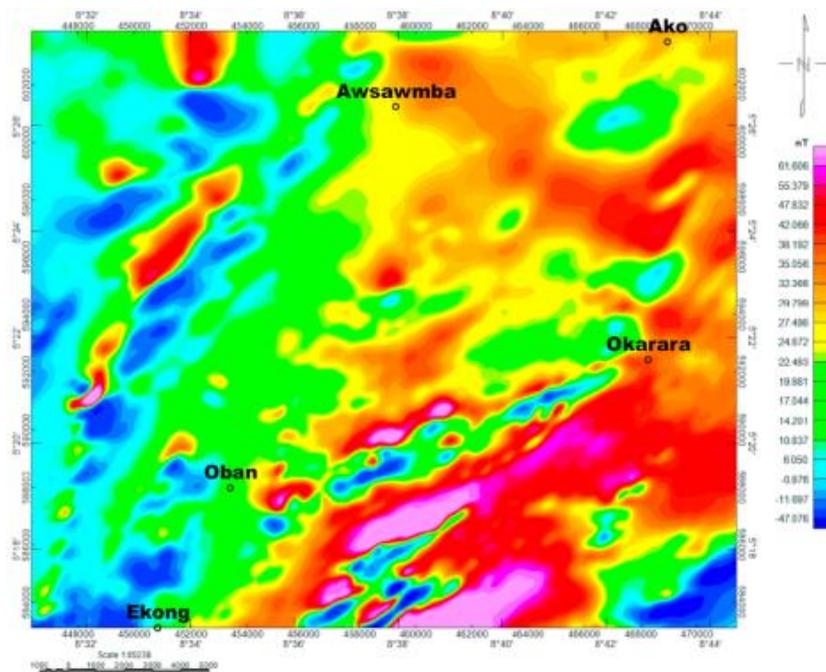


Рис. 4. Карта общей напряженности магнитного поля исследуемого района.

4.3.2. Обработка и анализ.

Образцы горных пород, собранные в районе, были подвергнуты петрографическому анализу с использованием микроскопа XP-213С. Полученная информация была использована для классификации, определения границ на геологической карте и связи с потенциальным марганцевым оруденением.

Канадская компания Fugro-Airborne Surveys (FAS) выполнила все необходимые методы фильтрации и коррекции аэромагнитных данных. Они были введены в Мировую геодезическую систему 84 (WGS 84) и Универсальную поперечную систему координат Меркатора в зоне 32 Северного полушария (UTM-32N) с использованием метода локального преобразования данных и проекции, соответственно. Файл данных был загружен в Oasis Montaj. Такие процессы, как разделение региональных остаточных аномалий, первая вертикальная производная (1VD), аналитические сигналы, отображение параметров источника (SPI) и деконволюция Эйлера, были всесторонне применены для извлечения структурной информации, такой как геологические контакты, разломы и их зоны, связанные с залежами полезных ископаемых в исследуемой районе.

В геофизических исследованиях наблюдаемая общая напряженность магнитного поля представляет собой сумму магнитных полей, генерируемых всеми подземными источниками. Цель конкретной магнитной интерпретации часто включает в себя определение границ мелкомасштабных целей, расположенных на определенной глубине, и магнитные отклики этих целей объединяются с региональным полем, которое обычно представляет собой отклики более обширных или более глубоких магнитных источников, чем более мелкие цели. Остаточные поля, создаваемые целевыми источниками, обычно удаляются из регионального поля с использованием метода разделения остаточно-региональных аномалий. Высоковолновые и коротковолновые компоненты магнитной аномалии называются региональными и остаточными аномалиями соответственно. Остаточные аномалии рассматриваются как небольшие локальные закономерности, но имеющие большое значение. Они предоставляют информацию о структурах важных для поисков полезных ископаемых. Обычный метод разделения региональных и остаточных аномалий использует либо низкочастотные (для региональных), либо высокочастотные (для остаточных) методы фильтрации. Фильтр верхних частот ослабляет частоты, более низкие, чем частота среза (λ_c) и пропускает высокочастотные сигналы. Он передает все частоты с $\lambda \geq \lambda_c$. Прямоугольный фильтр верхних частот может быть выражен в области 1D Фурье как:

$$L(\lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda < \lambda_c \\ 1, & \lambda \geq \lambda_c \end{cases} \quad (1)$$

Фильтр нижних частот ослабляет все частоты, превышающие частоту среза (λ_c) и пропускает низкочастотные сигналы. Точное число затухания зависит от конфигурации фильтра каждой частоты. Прямоугольный фильтр нижних частот может быть выражен в области 1D Фурье как:

$$L(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda \leq \lambda_c \\ 0, & \lambda > \lambda_c \end{cases} \quad (2)$$

1VD использовался для удаления длинноволновых характеристик магнитного поля, тем самым значительно улучшая разрешение близко расположенных и наложенных аномалий. Кроме того, было выполнено быстрое преобразование Фурье (FFT) в сочетании с передаточными функциями первой вертикальной производной и фильтром нижних частот с использованием данных об остаточной магнитной напряженности в сетке. Вертикальные градиентные фильтры идеально усиливают коротковолновые компоненты поля за счет длинноволновых волн. Применяемый фильтр аналитического сигнала (AS) играет важную роль в обнаружении источника магнитных минералов. Амплитуда аналитического сигнала может быть получена из квадратного корня из

квадратной суммы вертикальных и горизонтальных производных магнитного поля следующим образом:

$$\|ASIG(x, y)\| = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

где m является наблюдаемым магнитным полем.

Значение этого метода для улучшения данных заключается в том, что его амплитудная функция всегда положительна, а также в предположении о направлении намагничивания источника. Аналитический сигнал работает по принципу, аналогичному методу горизонтального градиента; идентифицируются пики амплитуды аналитического сигнала (AS). Выявленные максимумы аналитического сигнала могут быть использованы для обнаружения структур, ответственных за наблюдаемые магнитные аномалии над исследуемой областью. Метод AS помогает определить местоположение источника магнитной аномалии независимо от направления и остаточной намагниченности в источнике.

Оценка глубины методом деконволюции Эйлера использовалась для картирования геологических контактов в пределах района. Этот метод является определителем границ и методом оценки глубины, поскольку он автоматически вычисляет местоположение источника и глубину. Метод стандартной деконволюции Эйлера (st-ED) основан на решении уравнения однородности Эйлера:

$$(x - x_0) \frac{\partial m}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial m}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial m}{\partial z} = N(B - M) \quad (4)$$

где (x_0, y_0, z_0) представляет положение магнитного источника, который создает полное магнитное поле. M измеряется в (x, y, z) .

B и N является региональным значением общего магнитного поля и структурного индекса соответственно. Аппроксимация глубины с использованием визуализации параметров источника выводится из длины волны аналитического сигнала, который описывается как;

$$A_1(x, z) = \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} - j \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

где $j = \sqrt{-1}$, and $T(x, z)$ величина аномального суммарного магнитного поля; x и z являются ортогональными декартовыми координатами, представляющими вертикальное и горизонтальное направления, перпендикулярные простиранию, соответственно.

Аэромагнитные данные с сеткой для этого исследования были обработаны с использованием программного обеспечения Oasis Montaj версии 8.2. Данные были подвергнуты различным алгоритмам улучшения, таким как обнаружение границ и

обнаружение источников. Эти алгоритмы позволили разграничить линеаменты и магнитную зональность, связанные с литологией, и с наложенной минерализацией в неоднородных средах. Методы улучшения использовали изменение физических свойств, таких как магнитная восприимчивость и толщина литологических единиц. Структурная информация, улучшенная на основе обработанных магнитных данных, затем была извлечена с помощью ArcMap 10.4, программного обеспечения для ГИС. Поверхностная и приповерхностная структурная информация была оцифрована из обработанных аэромагнитных данных.

4.4 Выполненные ГРР.

4.4.1. Полевое геологическое картирование

Полевые исследования выявили присутствие роговообманкового гранитного и мигматитового (полосчатого) гнейсов, которые доминировали в районе в сочетании с амфиболитовыми и кварцитовыми грядами (фото 5а-е).



Фото 5. Выходы горных пород в районе исследований: (а) мигматитовые гнейсы, (b) однородный амфиболит, (с) поверхность амфиболита, (d) низменные полосчатые гнейсы, минеральная сегрегация светлых и темных полос и (е) крупный валун гранитной породы/

Обнажения горных пород сильно подвержены выветриванию с признаками минеральной полосчатости (обогащенная минералами сегрегация) и трещиноватости с ориентацией в направлениях N-S, ENE и NW-SE (фото 5d и фото 6).

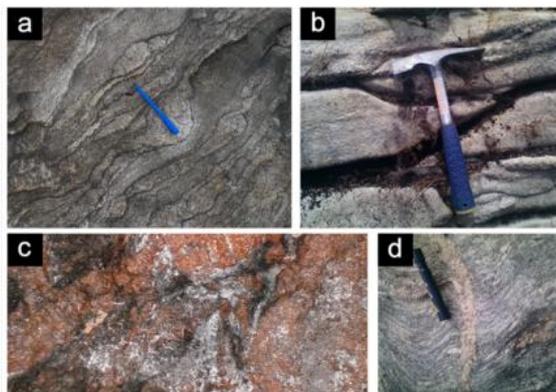


Фото 6. (а) мигматитовые гнейсы (плоскости расслоения), (b) узоры трещин, (с) пегматит неправильной формы и (d) полосчатый гнейс.

Трещиноватость пород (диаграмма рис. 7а), вмещающих марганцевую минерализацию преимущественно имеет E-W структуру. На поверхности минерализация сохранилась только в крупных устойчивых к выветриванию железо–марганцево–кварцевых валунах (рис. 7б).

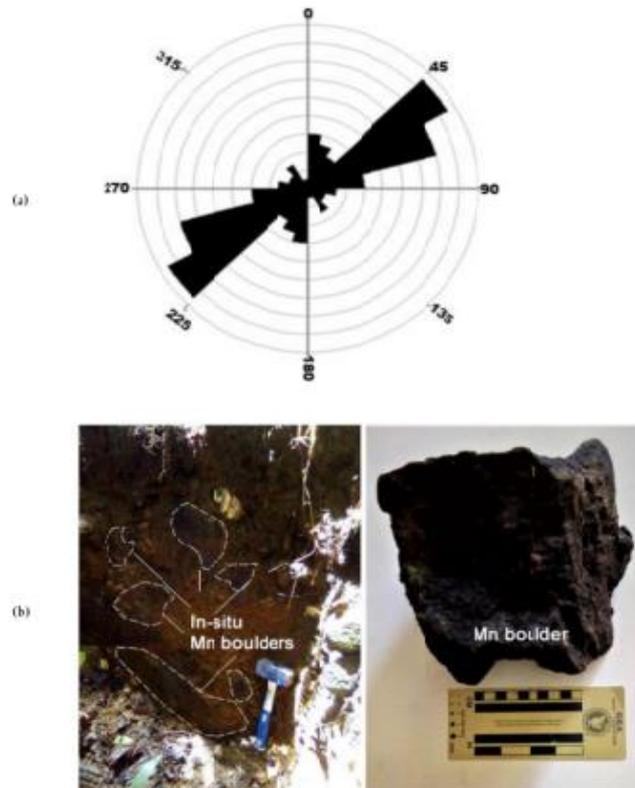


Рис. 7. (а) Диаграмма направлений трещиноватости. (б) шурф, вскрывший марганцевые валуны и валун (увеличено для наглядности)

Примечательно, что большинство кварцевых жил вблизи марганцевой минерализации приобретает черную окраску и имеют пятна железа.

Глубокое выветривание и толща покровных пород скрыли большую часть минерализованных жил в районе, за исключением крупных валунов (рис. 7б). Полевые наблюдения показали наличие интенсивного брекчирования, хлоритизации и аргиллизации по линейным зонам трещиноватости E-W направления. Кроме того, в осадках ручьев выявлено наличие зерен марганца. Петрографическое исследование гранитоидов и гнейсов с роговой обманкой выявило характерный состав пород (рис. 8; табл. 1). Распределение различных пород, их структурные особенности и характер литологических границ представлены на рисунке 9.

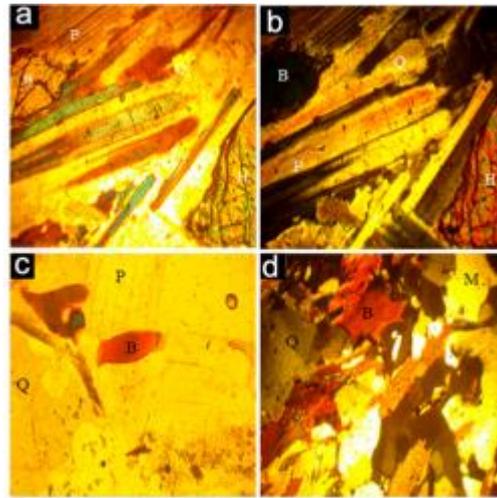


Рис. 8. Микрофотографии образцов горных пород, отобранных в ходе полевых исследований: (а) и (b) роговообманковый гранито-гнейс с полевыми шпатами и слюдой (биотит), (c) пегматит, (d) мигматит

Таблица 1. Модальный состав пород района исследований

Mineral	Migmatitic Gneiss (n = 4)	Hornblende Granite Gneiss (n = 5)	Amphibolite (n = 2)	Pegmatite (n = 2)	Charnockite (n = 1)
Quartz	45	35	5	19	39
Plagioclase	18	16	20	24	17
K-Feldspar	11	13	17	42	20
Biotite	19	21	17	9	8
Chlorite	2	0	0	0	0
Epidote	1	1	0	0	1
Muscovite	1	6	0	0	0
Garnet	0	1	3	2	0
Hornblende	1	7	33	0	11
Accessories	2	1	4	5	3
Total	100	100	100	100	100

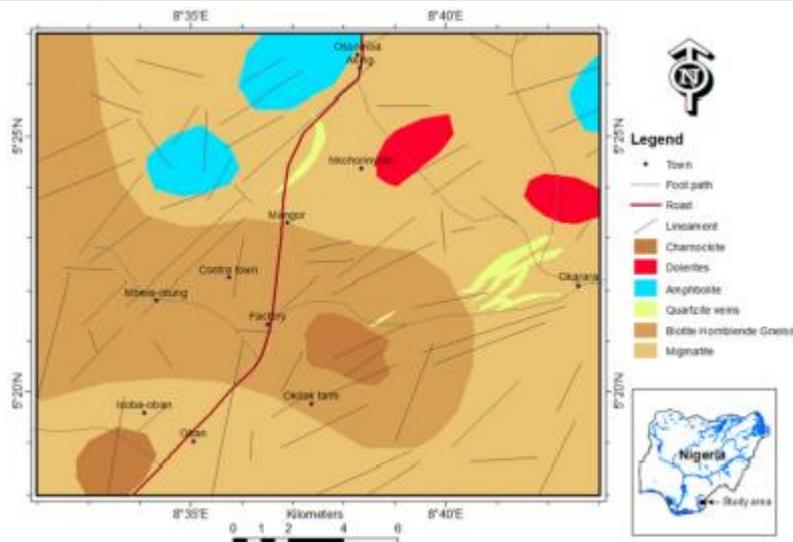


Рис. 9. Геологическая карта района исследований, показывающая распределение горных

4.4.2. Геофизические исследования.

Источниками высоких магнитных аномалий в исследуемом районе на карте магнитной интенсивности в диапазоне от 0,0034 нТл/км до 0,1262 нТл/км (рис. 10). являются ханокиты, долериты, гранитные гнейсы с роговой обманкой, амфиболиты, кварцитовые жилы и мигматитовые породы.

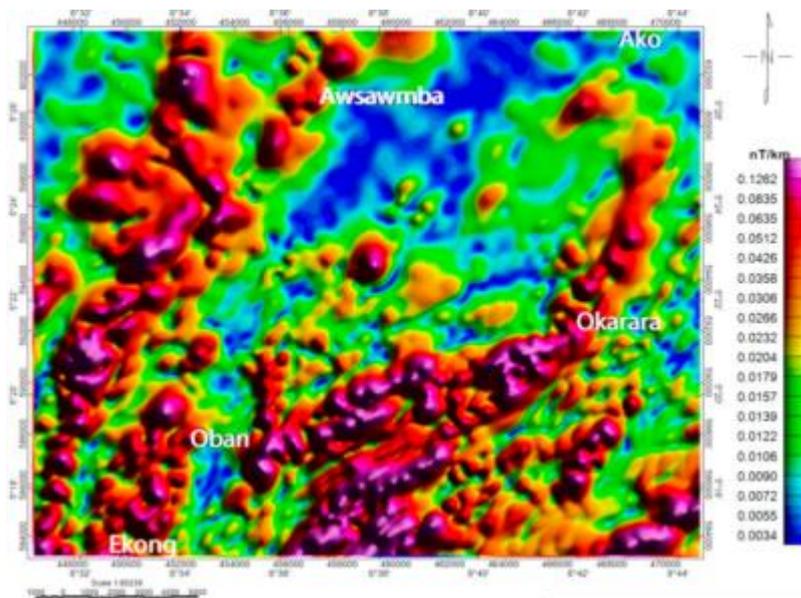


Рис. 10. Аналитическая карта амплитуды сигнала

Выветрелые породы фундамента и перекрывающего чехла характеризуются низким магнитным полем. Первая вертикальная производная позволяет идентифицировать аномалии магнитной восприимчивости, усиливающие интерпретированные геологические структуры. Первая карта вертикальной производной представила диапазон значений магнитной интенсивности от $-0,066$ нТл/км до $0,053$ нТл/км (рис. 11).

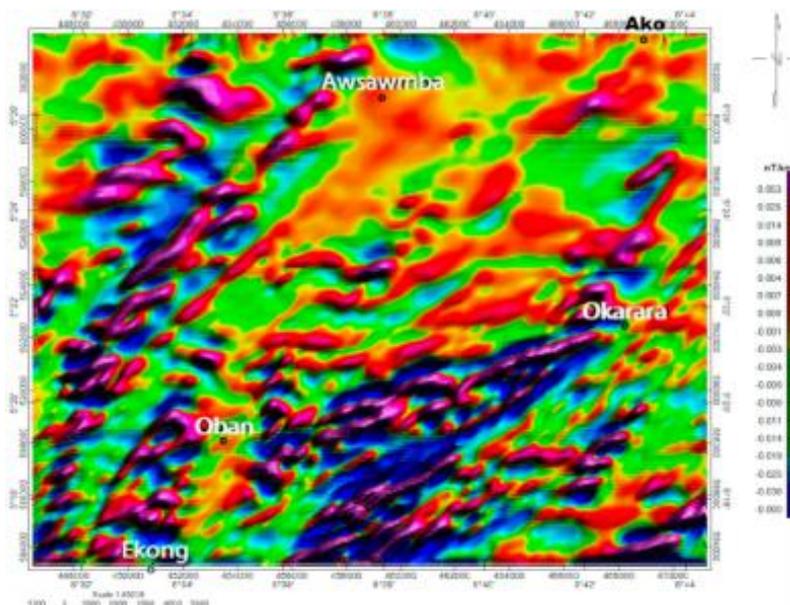


Рис. 11. Карта первой вертикальной производной

Производное изображение было продолжено вверх на 100 м, чтобы уменьшить влияние искусственных особенностей, которые могут повлиять на точность результатов. Первая карта вертикальной производной усиливает структурные компоненты, такие как трещиноватость в направлениях NE-SW. Общая ориентация согласуется с региональной геологией района. Положение известных проявлений

марганца были использовано для выделения перспективных поисковых участков (рис. 12, 13; табл. 2).

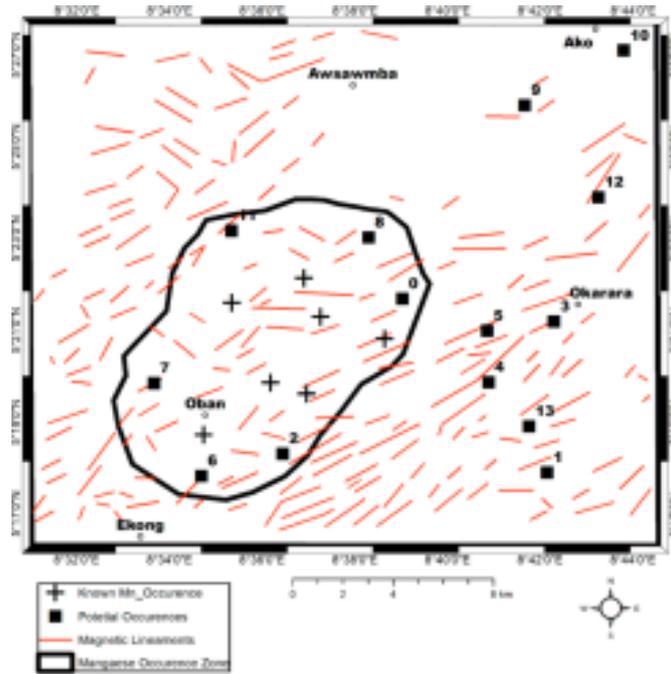


Рис. 12. Карта магнитных линеаментов изучаемой территории.

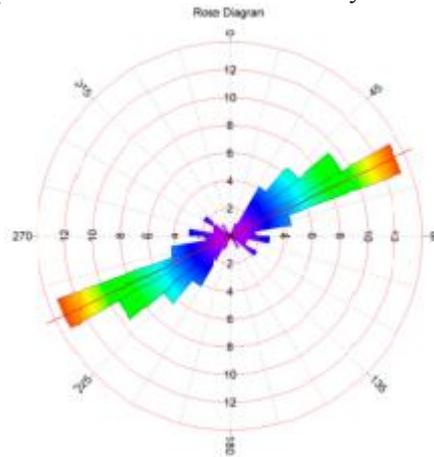


Рис. 13. Диаграмма направлений трещин.

Таблица 2. Координаты участков потенциального марганцевого оруденения.

ID	X LONG	Y LAT
0	8.650392269	5.361502236
1	8.702411124	5.29835895
2	8.607342012	5.30508693
3	8.704877257	5.353322316
4	8.681387335	5.331182978
5	8.680924998	5.349889541
6	8.578128548	5.29713331
7	8.561047898	5.330773567
8	8.638183097	5.383744871
9	8.694346765	5.43181191
10	8.72989464	5.45175794
11	8.588898983	5.386156108
12	8.720843053	5.398378085
13	8.695901765	5.315178112

Карта остаточной магнитной интенсивности (RMI) (рис. 14) была получена после удаления региональных магнитных эффектов из данных TMI.

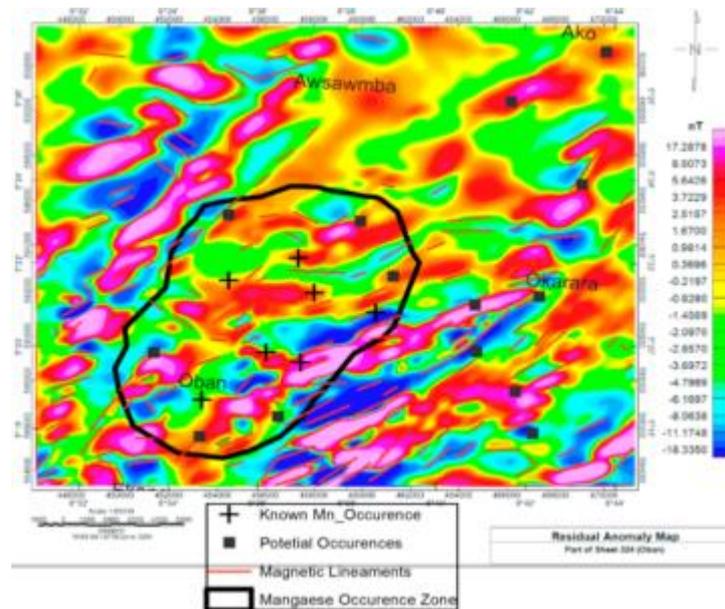


Рисунок 14. Карта остаточных магнитных аномалий.

Значения магнитной интенсивности в пределах исследуемой области варьируются от -18.3350 нТл для магнитного низкого и 17.2878 нТл для магнитного высокого. Аномалии высокой магнитной интенсивности представляют собой залегание основных магматических и метаморфических пород, таких как долериты, ханокиты, гранитные гнейсы с роговой обманкой, амфиболиты и мигматитовые гнейсы.

Однако аномалии низкой магнитной интенсивности в этом районе представляют собой выветрившиеся породы фундамента и перекрывающие отложения элювия и аллювия. Сопоставив геологию района с интерпретированными аэромагнитными характеристиками (исходный сигнал, первая вертикальная производная, магнитные линеаменты и остаточные магнитные аномалии), стало ясно, что зоны минерализации марганца в этом районе структурно контролируются. Они связаны с трещинными и разломными зонами в пределах роговобманковых гранитных гнейсов, амфиболитов, мигматитовых гнейсов и кварцитовых жил.

Методы визуализации параметров источника (SPI) и декомпозиции Эйлера представляют собой процессы улучшения данных для оценки глубины и местоположения магнитных тел. Они подходят для определения геометрии магнитных источников и изменений их восприимчивости. Цветовые диапазоны (розово-голубой), отображающие различные глубины и местоположения различных магнитных источников в исследуемом районе, представлены картами SPI (рис. 15) и сеткой разложения Эйлера (рис. 16).

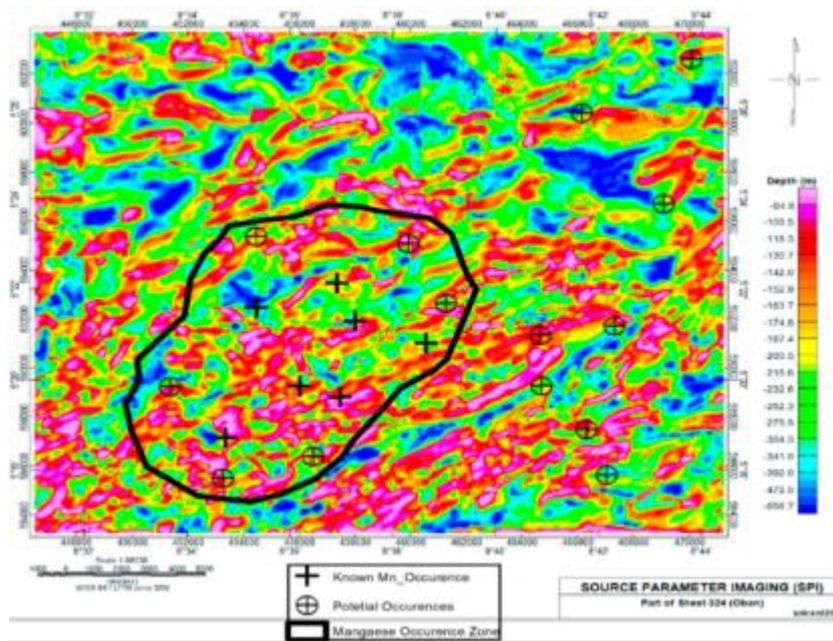


Рис. 15. Карта визуализации параметров известных и потенциальных участков Mn оруденения.

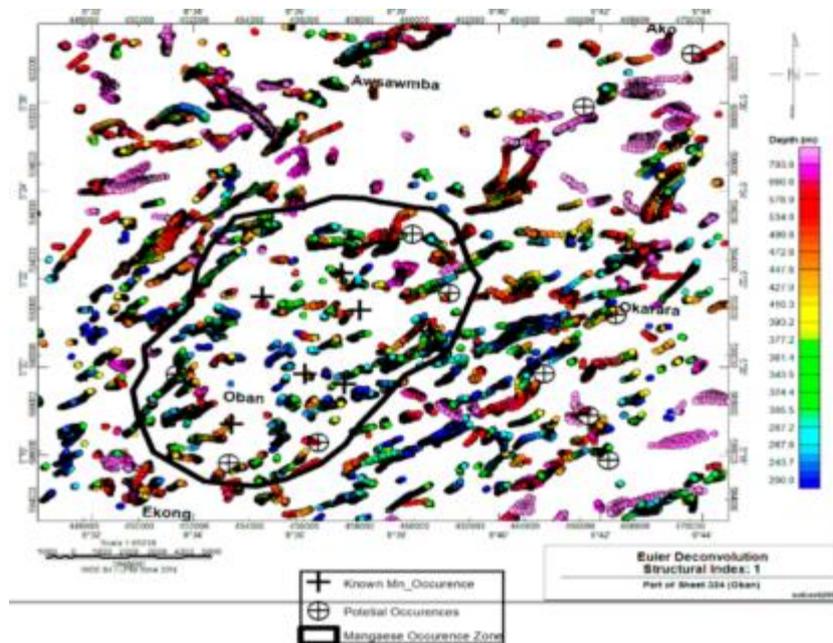


Рис. 16. Стандартное разложение Эйлера (структурный индекс = 1,0; макс. % допуска глубины = 5, окно размер = 10) с известными и потенциальными участками Mn оруденения.

Отрицательные знаки на цветной панели условных обозначений карты SPI указывают на изменение глубины от поверхности. SPI представил небольшие глубины (красно-розовые), средние глубины (желто-красные) и большие глубины (лимонно-зелено-синие) с диапазонами 84-142 м, 152-200 м и 215-656 м соответственно. Разложение Эйлера показывает глубину мелких (от 200 до 377 м), промежуточных (от 393 до 472 м) и глубоких (от 499 до 793 м) магнитных источников, характеризующихся сине-лимонно-зеленым, желто-красным и красно-розовым цветами соответственно. Эти результаты показывают, что большая часть залежей марганца локализована в пределах от мелких до средних глубин.

4.5 Результаты.

Таким образом, исследования показали, что аэромагнитный метод, может дополнить геологическое картирование для улучшения структурной интерпретации при поисках полезных ископаемых. Потенциальные участки развития марганцевого оруденения в пределах исследуемого района внутри площадей развития оксидов железа и с интенсивными латеритными изменениями показаны на рисунке 17.

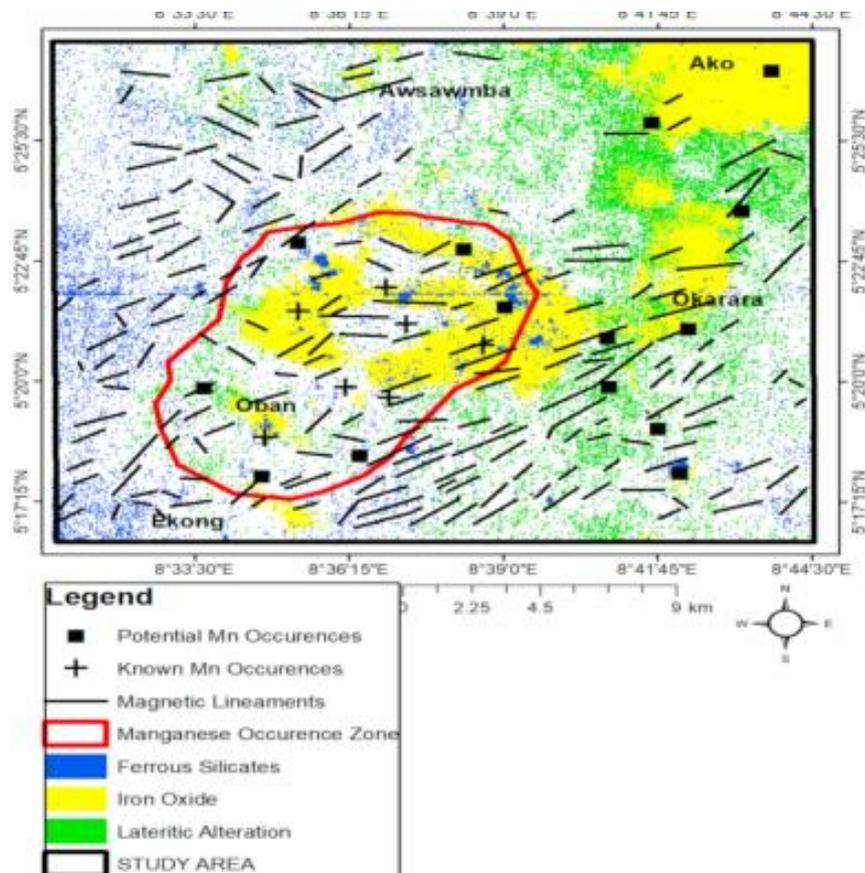


Рис. 17. Карта потенциальных участков оруденения марганца.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ASTER и WORLD VIEW-3 ПРИ ПОИСКАХ [6].

(м-ние Пуланг, ЮЗ Китая)

5.1 Введение

Медно-порфиновые месторождения (PCD), являющиеся одним из наиболее значительных ресурсов меди в мире, производят почти три четверти мировых запасов меди. PCD обширны по масштабам, характеризуются полностью однородной минерализацией, содержат неглубокие интрузии и подходят для крупномасштабной добычи.

Район м-ния Пуланг является одним из основных районов ресурсов меди в Китае. Он характеризуется развитием типичной “порфировой” зональности гидротермально-метасоматических изменений пород, которая включает калийно-окремненные, филлические и пропилитовые зоны от центра к внешним участкам. Калиево-окремненные и филлические изменения тесно связаны с минерализацией меди высокого качества - чем более оптимизировано зонирование, тем выше обогащение минерализацией. Таким образом, схемы пространственного распределения калийно-окремненных и филлических зон являются важными индикаторами при поисках. Однако из-за удаленности района, сложной ландшафтно-геоморфологической обстановки и сурового климата традиционные методы полевых исследований для выявления зон изменений является затруднительными. Поэтому использование технологии дистанционного зондирования для картирования минералов гидротермальных изменений может способствовать выявлению перспективных участков.

Многочисленные исследования успешно использовали ДДЗ в поисковых целях по всему миру. Наиболее широко используемыми для идентификации изменений являются усовершенствованные космические радиометры теплового излучения (ASTER). Видимый и ближний инфракрасный (VNIR) и коротковолновый инфракрасный (SWIR) диапазоны ASTER могут быть использованы для обнаружения гидроксилсодержащих, оксидов железа и карбонатных минеральных групп благодаря их диагностическим спектральным особенностям. Идентификация окремненных изменений может быть выполнена с использованием тепловых инфракрасных (TIR) полос ASTER из-за различных характеристик спектров излучения растягивающих колебаний Si-O-Si в области TIR. В настоящее время наиболее точными мультиспектральными данными для идентификации измененных минералов являются WorldView-3 (WV-3), которые демонстрируют самые высокие радиационные, спектральные и пространственные характеристики в VNIR (восемь полос с

пространственным разрешением 1,2 м) и SWIR (восемь полос с пространственным разрешением 3,7 м). В Pulang PCD было подтверждено, что точность извлечения измененных минералов, основанных на данных WorldView-3, значительно улучшена по сравнению с данными ASTER.

Среди методов обнаружения гидротермальных изменений используются такие как: соотношение полос (BR), анализ главных компонент (PCA), фильтрация с согласованной настройкой смеси (MTMF) и машина опорных векторов (SVM). Недавно метод спектральной области (S-A), предложенный для характеристики взаимосвязи спектра и площади, показал, что точность картирования минералов гидротермальных изменений может быть значительно улучшена в сочетании с обычным методом PCA.

Основными целями данного исследования были:

1. обнаружение гидротермальных изменений минералов с использованием методов BR, PCA и S-A для данных ASTER и WV-3;
2. изучение значения изменений минералов в качестве индикаторов для понимания металлогенических характеристик и в качестве поисковых признаков;
3. заверка результатов с помощью полевых исследований и петрографического анализа.

5.2. Материалы и методы

5.2.1. Геологические условия

Район Пуланг, расположен на южной оконечности островной дуги Идун на юго-западе Китая (рис. 1) и является продуктом субдукции океанической коры Гарзе-Литанг в западном направлении.

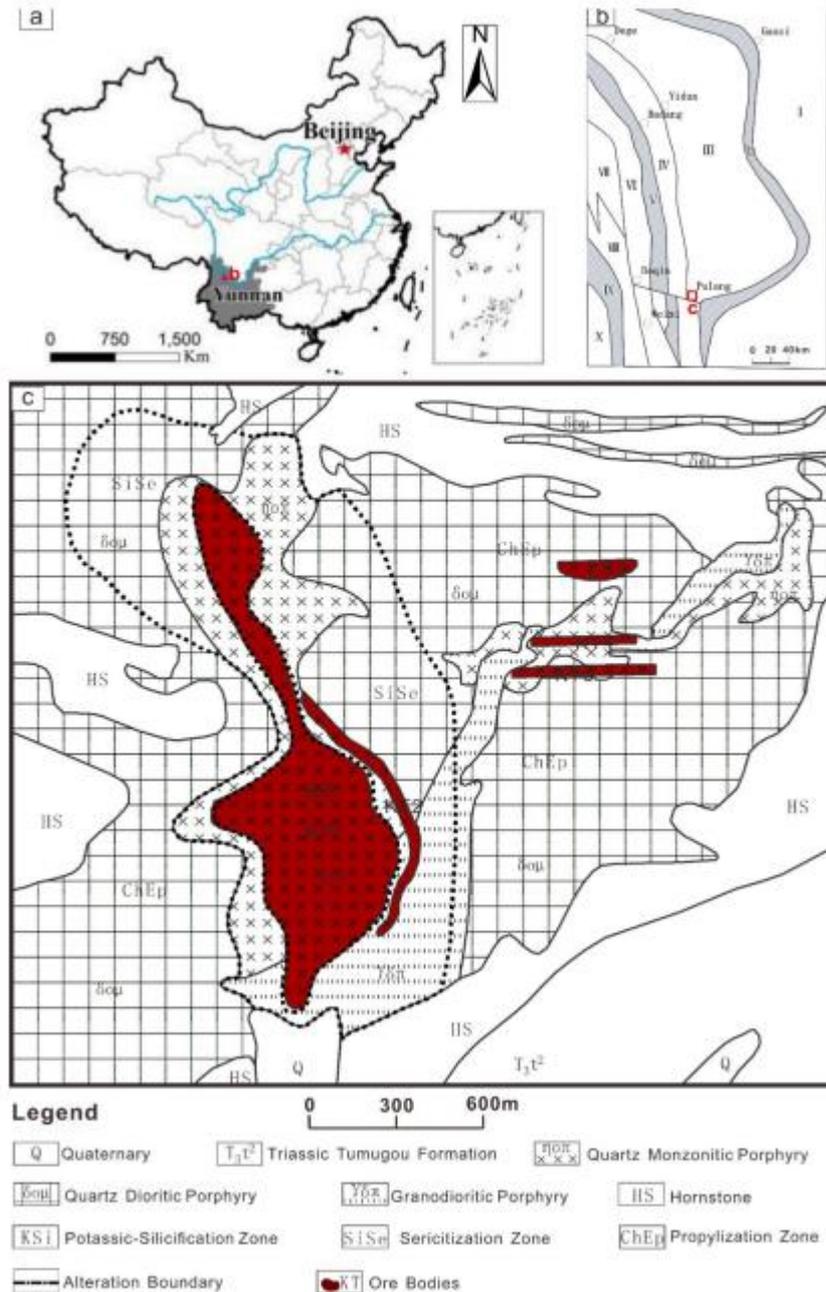


Рис. 1. Геологическая карта PCD Пуланга а) Схема расположения; (б) Тектоническая карта островной дуги Юдун; (в) Упрощенная геологическая карта PCD Пуланга. Я — Янцзы пластина; II — пояс соединения пластин Ганзи-Литанг; III — островная дуга Юдун; IV — микроблок Чжунза; V — зона слияния р. Цзиньша; VI — вулканическая дуга Джанда-Викси; VII — блок Чанду-Ланьпин; VIII — горно-вулканическая дуга Саньда-Цзинхун; IX — Ланканг Речной пояс; X — блок Баошань.

М-ние Пуланг, крупнейшее индосское месторождение содержит 4,31 млн тонн меди со средним содержанием 0,34%. Его слагают андезиты верхнетриасовой формации Тумугу, а также четвертичные обломочные породы. Интрузии триасового возраста представлены кварцевым диоритовым, кварцевый монцонитовым и гранодиоритовым порфирами. Кварцевый диоритовый порфир имеет возраст $219,6 \pm 3,5$ млн лет (U–Pb датирование цирконом) и впоследствии был пересечен кварцевым монцонитовым и гранодиоритовым порфирами, возраста $212,8 \pm 1,9$ млн лет и $206,3 \pm 0,7$ млн лет (U–Pb датирование цирконом), соответственно. Считается, что кварцевый

монцонитовый порфир связан с минерализацией, поскольку он имеет тот же возраст, что и молибденит Re–Os isochron ($213 \pm 3,8$ млн лет) из рудного тела, и отличается относительно высокими концентрациями меди по сравнению с другими порфирами.

Породы сильно изменены и имеют типичную порфировую зональность изменений. Зональность включает калийно-кремненные, филлитовые и пропилитовые зоны. Основные рудные тела залегают в калийно-кремненных и филлических зонах, слабая минерализация - в пропилитовой зоне. Калиевый полевой шпат ($K[AlSi_3O_8]$) и кварц (SiO_2) являются основными минералами изменений, связанными с калийно-кремненной зоной; серицит ($KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH, F)_2$) и кварц (SiO_2) - с филлической зоной; хлорит ($(Fe, Mg, Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$) и эпидот ($Ca_2(Al,Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$) - с зоной пропилитизации.

5.2.2. ДДЗ.

В таблице 1 представлены технические характеристики данных ASTER и WV-3, использованных для идентификации минералов гидротермально-метасоматических изменений.

Табл. 1. Технические характеристики данных ASTER и WV-3.

Sensors	Subsystem	Band Number	Spectral Range (μm)	Spatial Resolution (m)	Swath Width (km)
ASTER	VNIR	1	0.520–0.600	15	60
		2	0.630–0.690		
		3	0.760–0.860		
	SWIR	4	1.600–1.700	30	
		5	2.145–2.185		
		6	2.185–2.225		
		7	2.235–2.285		
		8	2.295–2.360		
		9	2.360–2.430		
	TIR	10	8.125–8.475	90	
		11	8.475–8.825		
		12	8.925–9.275		
		13	10.25–10.95		
		14	10.95–11.65		
WorldView-3	VNIR	1	0.400–0.450	1.24	13.2
		2	0.450–0.510		
		3	0.510–0.580		
		4	0.585–0.625		
		5	0.630–0.690		
		6	0.705–0.745		
		7	0.770–0.895		
		8	0.860–1.040		
	SWIR	9	1.195–1.225	3.70	
		10	1.550–1.590		
		11	1.640–1.680		
		12	1.710–1.750		
		13	2.145–2.185		
		14	2.185–2.225		
		15	2.235–2.285		
		16	2.295–2.365		

Мультиспектральный спутник ASTER включает три полосы VNIR с пространственным разрешением 15 м в диапазоне от 0,52 до 0,86 мкм; шесть полос SWIR с пространственным разрешением 30 м в диапазоне от 1,6 до 2,43 мкм; и пять

тепловых инфракрасных (TIR) полос с пространственным разрешением 90 м в диапазоне от 8,0 до 14,0 мкм. Каждая сцена данных ASTER занимает площадь $60 \times 60 \text{ км}^2$.

Мультиспектральный коммерческий спутник WV-3 имеет самый высокий уровень излучения, а также спектральный и пространственный уровни среди мультиспектральных спутниковых датчиков. Он содержит восемь полос VNIR (в диапазоне от 0,42 до 1,04 мкм) с пространственным разрешением 1,2 м и восемь полос SWIR (в диапазоне от 1,2 до 2,33 мкм) с пространственным разрешением 3,7 м. Каждая сцена WV-3 занимает площадь $13,2 \times 13,2 \text{ км}^2$.

Была проведена атмосферная коррекция данных ASTER, которая необходима для устранения влияния атмосферного ослабления и изменения масштаба излучения в соответствии с данными отражательной способности поверхности. Алгоритм быстрого анализа атмосферы гиперкубов в прямой видимости (FLAASH) был применен к полосам VNIR и SWIR сцены ASTER с использованием модели зимней атмосферы в средних широтах и модели аэрозоля в сельской местности. Чтобы согласовать полосы VNIR, полосы SWIR были пересчитаны до пространственных размеров 15 м методом пересчета ближайшего соседа. Затем была сгенерирована слоевая укладка полос VNIR и SWIR. Аналогичным образом, полосы VNIR и SWIR WV-3 были скорректированы по атмосфере с помощью алгоритма FLAASH, преобразуя относительные радиометрически скорректированные изображения в спектральную отражательную способность верхней части атмосферы; а затем методом передискретизации ближайшего соседа был сгенерирован пакет слоев полос VNIR и SWIR длиной 1,24 м.

5.2.3. Методы картирования минералов гидротермальных изменений.

Методы BR и PCA обработки данных ASTER были использованы для получения характеристик изменения кварца; методы PCA и S-A - для сопоставления минералов изменения серицита, хлорита и эпидота с данными WV-3.

Комбинация методов анализа соотношения полос и главных компонент:

Метод BR (Соотношение полос) - это принцип алгебраической операции. Различные альтерационные минералы имеют разные длины поглощения и характеристики пика отражения на спектральных кривых. Их геологическая информация об измененных минералах может быть эффективно увеличена, а эффекты тени, вызванные топографией, могут быть уменьшены путем вычисления отношения значения коэффициента отражения пика отражения к длине поглощения.

Метод PCA (Анализ основных компонентов). Из-за высокой корреляции изображения являются избыточными. PCA линейно объединяет

исходную характеристику i для построения j основных компонент. Преобразование выражается следующим образом:

$$Y = AX = \sum_{m=1}^j A_m X_m + \sum_{m=j+1}^i A_m X_m \quad (1)$$

где X - данные дистанционного зондирования до преобразования, Y - данные дистанционного зондирования после преобразования, а A - матрица преобразования.

Суть PCA заключается в уменьшении размерности. Выполняя преобразование главных компонент, избыточные исходные полосы могут быть преобразованы в новый набор некогерентных полос, так что соответствующая информация независимо распределяется между новыми PCs. Таким образом, PCA играет роль разделения информации. Знак и величина нагрузок собственных векторов определяют основную составляющую релевантной информации.

В данном исследовании методы BR и PCA были объединены, чтобы в полной мере использовать их соответствующие преимущества при извлечении кварцевых изменений. Процедура заключалась в следующем. (1) Кварцевый индекс (QI), карбонатный индекс (CI) и основной индекс (MI) определялись с помощью расчета соотношений; (2) QI, CI и MI определялись как три компонента анализа основных компонент в соответствии со значением вклада вектора признаков.

Анализ главных компонент и методы спектральной области:

Модель S-A представляет собой сложный метод, учитывающий распределения пространственной и частотной областей. Он может быть использован для идентификации анизотропного обобщенного самоподобия в частотной области и обнаружения различных локальных особенностей энергетического спектра, с помощью которых фильтры минералов гидротермальных изменений отделяются от фона и могут быть сконструированы. Формула выглядит следующим образом:

$$A(> S) \propto S^{-\beta} \quad (2)$$

где S - спектральная плотность энергии главного компонента соответствующей информации в частотном пространстве; A - область спектральной плотности энергии, которая превышает критическое значение (S_0); и β доступно в журнале $A(>S_0)$ -диаграмма журнала.

При обнаружении информации о минералах гидротермальных изменений с помощью дистанционного зондирования, S представляет собой значение пикселя данных дистанционного зондирования, а A представляет собой номер пикселя, который больше соответствующего значения пикселя. На логарифмической диаграмме различные фрактальные взаимосвязи могут быть представлены различными прямыми сегментами, а точка пересечения двух прямых сегментов является пороговым

значением сегментации информации о фоновых и гидротермальных минералах. На основе порогового значения фильтр сегментации может быть сконструирован для отделения релевантной информации от фона с использованием обратного преобразования Фурье.

Комбинация методов PCA и S-A была успешно применена для улучшенного обнаружения минералов со слабыми изменениями в отличие от простого использования обычного метода PCA.

5.3. Результаты

Основой для картирования измененных минералов являются спектральные отклики.

5.3.1. Извлечение изменений минералов с использованием комбинации методов

Кварц имеет сильный пик отражения в тепловых инфракрасных диапазонах 10 и 12 данных ASTER и сильный пик поглощения в полосе 11 данных ASTER (рис. 2).

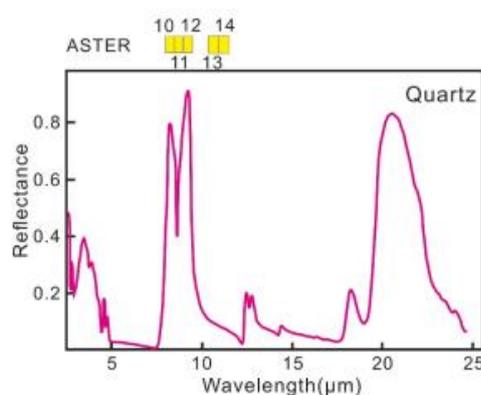


Рис. 2. Спектральные кривые кварца из тепловых инфракрасных спектров по данным ASTER (спектральные кривые из спектральной библиотеки USGS версии 7).

В соответствии с характеристиками отклика кварца в инфракрасных диапазонах ASTER thermal предложен кварцевый индекс ($QI = B11 \times B11/B10 \times B12$) для идентификации информации о кварце. В то же время предложен карбонатный индекс ($CI = B13/B14$) и основной индекс ($MI = B12/B13$), используя данные ASTER в инфракрасных диапазонах. Индексы QI, CI и MI использовали в качестве входных наборов данных для запуска PCA и нанесения на карту кварцевых, карбонатных и др. минералов на полосах TIR ASTER.

В таблице 2 приведена матрица собственных векторов кварца, полученная с помощью метода PCA. QI (0,725769) является положительным знаком и имеет большое значение, в то время как CI (-0,178896) и MI (-0,664270) являются отрицательными. Следовательно, яркий пиксель (значение пикселя > 0) может быть представлен как минерал изменения кварца.

Табл. 2. Матрица собственных векторов серицита, полученного методом PCA

Eigenvector	QI	CI	MI
PC1	0.620732	0.586557	0.520233
PC2	0.725769	-0.178896	-0.664270
PC3	0.296565	-0.789903	0.536752

Серицит, хлорит и эпидот были извлечены с использованием комбинации методов PCA и S-A наряду с данными WV-3, которые тесно связаны с филлитовыми и пропилитовыми зонами.

Выбор полосы идентификации измененных минералов был основан на характеристическом спектре с наибольшей разницей в отражательной способности в данных WV-3 (рис. 3).

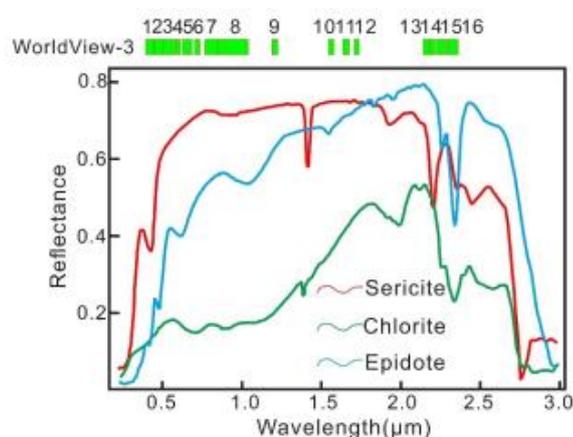


Рис. 3. Спектральные кривые серицита, хлорита и эпидота от видимого до коротковолнового инфракрасного спектра в данных WV-3

Серицит имеет пик отражения в полосах 6 и 15 и впадину поглощения в полосах 1 и 14. Следовательно, полосы 1, 6, 14 и 15 используются для преобразования PCA в качестве входных полос. Таблица 3 представляет собой матрицу собственных векторов серицита, полученную с помощью метода PCA.

Табл. 3. Матрица собственных векторов серицита, полученного методом PCA

	Band 1	Band 6	Band 14	Band 15
PC1	0.076493	0.165927	0.716485	0.673250
PC2	-0.490367	-0.845052	0.209057	0.041501
PC3	-0.451157	0.364897	-0.538114	0.611344
PC4	0.741719	-0.353844	-0.391634	0.413849

Учитывая спектральные характеристики серицита, знак коэффициента при 1 и 14 должен быть отрицательным, а знак коэффициента при 6 и 15 должен быть положительным. Таким образом, PC3 был определен как основной извлекаемый компонент серицита.

Хлорит проявлял пики отражения в полосах 3 и 13 и впадины поглощения в полосах 5 и 16. Следовательно, полосы 3, 5, 13 и 16 использовались для

преобразования PCA в качестве входных полос. В таблице 4 приведена матрица собственных векторов хлорита методом PCA.

Табл. 4. Матрица собственных векторов хлорита по методу PCA

	Band 3	Band 5	Band 13	Band 16
PC1	0.171027	0.127509	0.839833	0.499170
PC2	-0.816718	-0.535923	0.172496	0.126504
PC3	0.122032	-0.148993	-0.503014	0.842548
PC4	-0.537429	0.821176	-0.109095	0.157921

Учитывая спектральные характеристики хлорита, знак коэффициента при 5 и 16 должен быть отрицательным, а знак коэффициента при 3 и 13 должен быть положительным. Отрицательное значение PC4 удовлетворяет вышеуказанным условиям. Таким образом, PC4 было определено, что хлорит является основным извлекаемым компонентом.

Эпидот имеет пики отражения в полосах 7 и 13 и впадины поглощения в полосах 4 и 16. Следовательно, 4, 7, 13 и 16 были использованы для преобразования PCA в качестве входных полос. В таблице 5 приведена матрица собственных векторов хлорита методом PCA.

Табл. 5. Матрица собственных векторов хлорита по методу PCA

	Band 4	Band 7	Band 13	Band 16
PC1	0.047524	0.995742	0.065523	0.044114
PC2	-0.227916	0.085206	-0.637216	-0.731266
PC3	-0.971539	0.029576	0.118582	0.202918
PC4	0.043679	-0.019055	-0.758684	0.649714

Учитывая спектральные характеристики эпидота, знак коэффициента на 4 и 16 должен быть отрицательным, а знак коэффициента на 7 и 13 должен быть положительным. Отрицательное значение PC4 удовлетворяет вышеуказанным условиям. Таким образом, PC4 было определено, что это основной извлекаемый компонент эпидота.

Основной компонент соответствующих измененных минералов определяется с использованием вышеуказанной обработки, а затем в этом основном компоненте применяли метод S-A. Процесс извлечения альтерационных минералов был следующим. Во-первых, определенный основной компонент альтерационных минералов был преобразован из пространственной области в частотную область. Во-вторых, была сгенерирована диаграмма $\log(S)-\log(A)$, где значение частоты было представлено через S, а количество пикселей - через A соответственно. В-третьих, в соответствии с фрактальными характеристиками логарифмической диаграммы может быть получен порог фрактального фильтра минералов изменения и фона, который является точкой перегиба кривой. В этом исследовании пороговые значения фрактального фильтра для серицита, хлорита и эпидота составляли 2,80, 1,90 и 1,60

соответственно; а затем фильтр определялся со значениями $\log(S)$, превышающими 2,80, 1,90 и 1,60, которые представляли серицит, хлорит и эпидот соответственно. Наконец, обратное преобразование Фурье было использовано для извлечения серицита, хлорита и эпидота из фона с помощью вышеупомянутого фильтра (рис. 4).

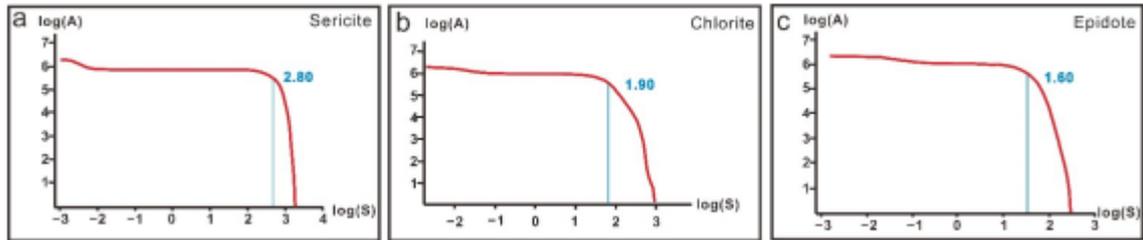


Рис. 4. Диаграмма $\log(S)$ - $\log(A)$ серицита, хлорита и эпидота. (а) Порог фрактального фильтра серицита равен 2,80; (б) порог фрактальной фильтрации хлорита 1,90; и (с) порог фрактального фильтра эпидота равен 1,60.

Результаты идентификации изменения кварца показаны на рисунке 5а. Рисунок 5b–d представляет собой результат гидротермального изменения минералов, извлеченных с использованием комбинации методов PCA и S-A вместе с данными WV-3.

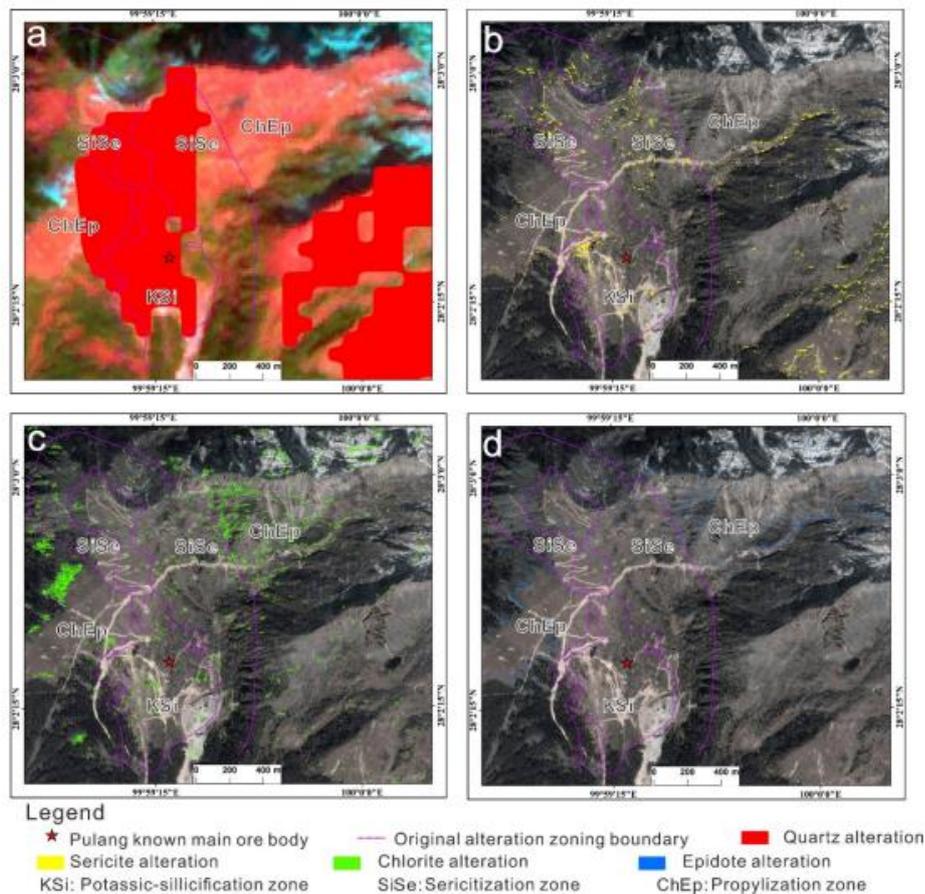


Рис. 5. Результаты извлечения гидротермальных минералов по данным ASTER и WV-3. а) изменение кварца; б – серицитовые изменения; (в) хлоритовые изменения; (г) изменение эпидота; фон а — составное изображение Band 6(R) 3(G) 2(B) данных ASTER; фон (b–d) — составное изображение Band 5(R) 3(G) 2(B) данных WorldView-3.

Извлеченные изменения кварца в основном сосредоточены во внутренней и юго-восточной частях основного рудного тела Пуланга (рис. 5а); извлеченные изменения серицита в основном распределены во внутренней, северо-восточной и юго-восточной частях основного рудного тела (рис. 5б); в то время как извлеченные изменения хлорита и эпидота широко распространены во внешней и северо-восточной частях. (рис. 5в, г).

5.3.2 Признаки изменений минералов в разломах.

Структура рудного поля включает разломы (каналы проникновения рудных флюидов). Процесс рудообразования сопровождается гидротермально-метасоматическими изменениями пород и минералов. Структура и минерализация тесно связаны. Участки пересечения линейных и кольцевых структур хорошо коррелируются с областями интенсивного развития изменений. Анализ изменений, извлеченных с помощью данных WV-3, показал, что наложенные процессы серицитизации, эпидотизации и хлоритизации обнаружены в зоне А в СВ части основного рудного тела Пуланга, (рис. 6).

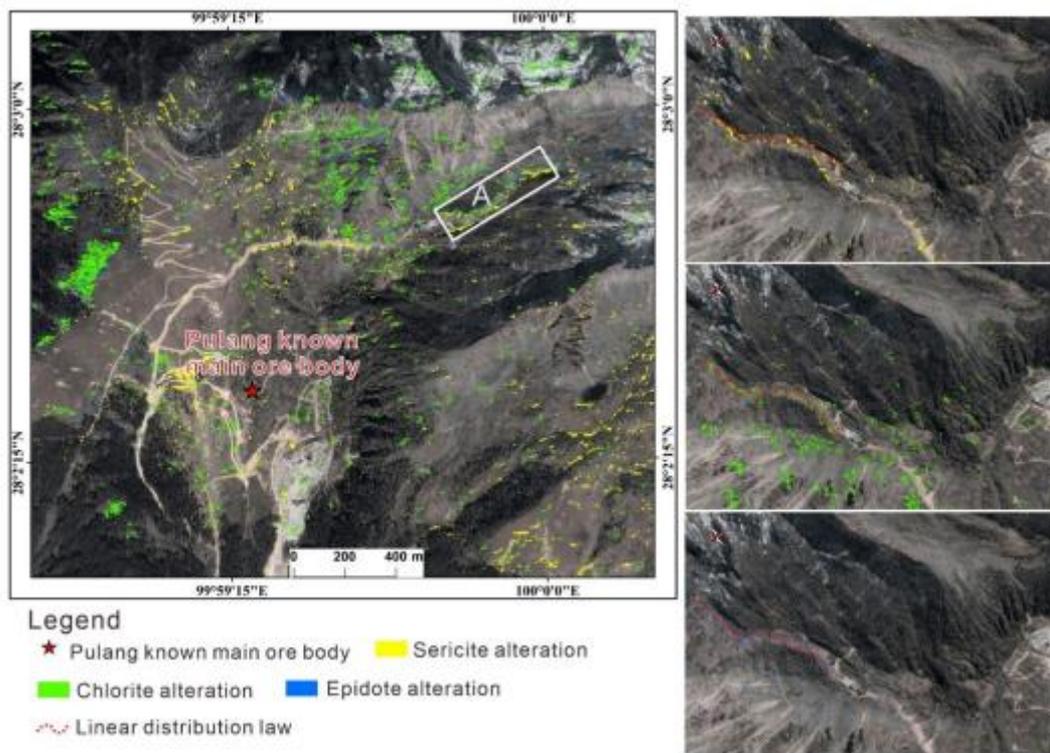


Рис. 6. Характеристики распределения гидротермально измененных минералов.

Часто они имеют линейный характер распределения на местности и могут быть связаны с разломами. Трассировка разломов была выполнена с использованием технологии 3D-реконструкции изображения в сочетании с распределением серицита, хлорита и эпидота

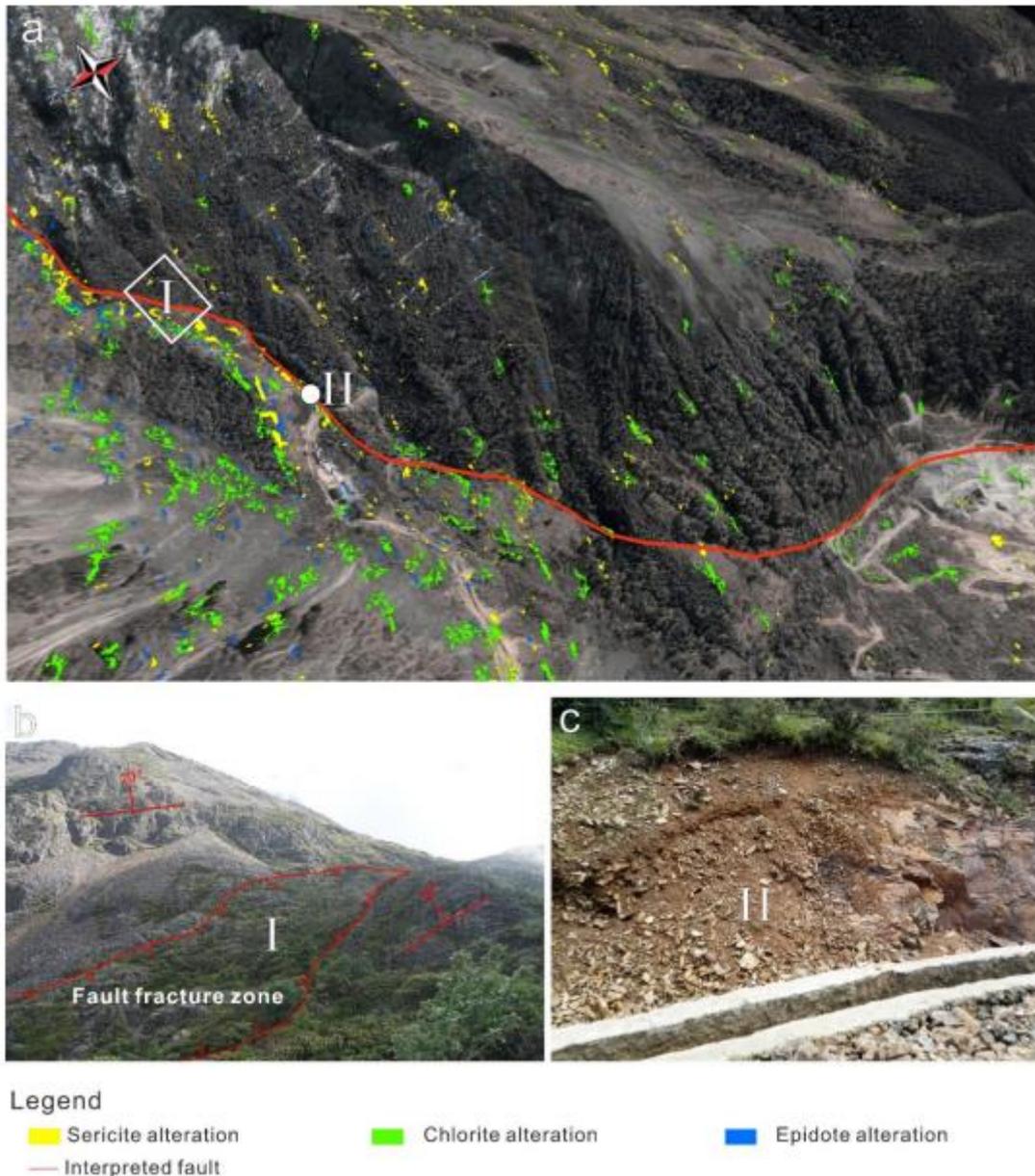


Рис. 7. Трехмерная реконструкция изображения дистанционного зондирования и полевая проверка предполагаемого разлома. (а) 3D-реконструкция изображения ДЗЗ и предполагаемого разлома; (б) полевая проверка трассы разлома; с) обнажение разлома.

Чтобы проверить наличие разлома было проведено специальное полевое обследование. След разлома был обнаружен в точке I, а выход зоны разлома - в точке II (рис. 7).

5.3.3 Реконструкция зональности изменений

Считалось, что зональность на м-нии РСД Пуланг в основном аналогична обычным порфировым объектам с типичными калийно-окремненными, филлитовыми и пропилитовыми зонами от центра к внешним участкам. Фиолетовая линия на рисунке 8 представляет собой границу зоны изменений.

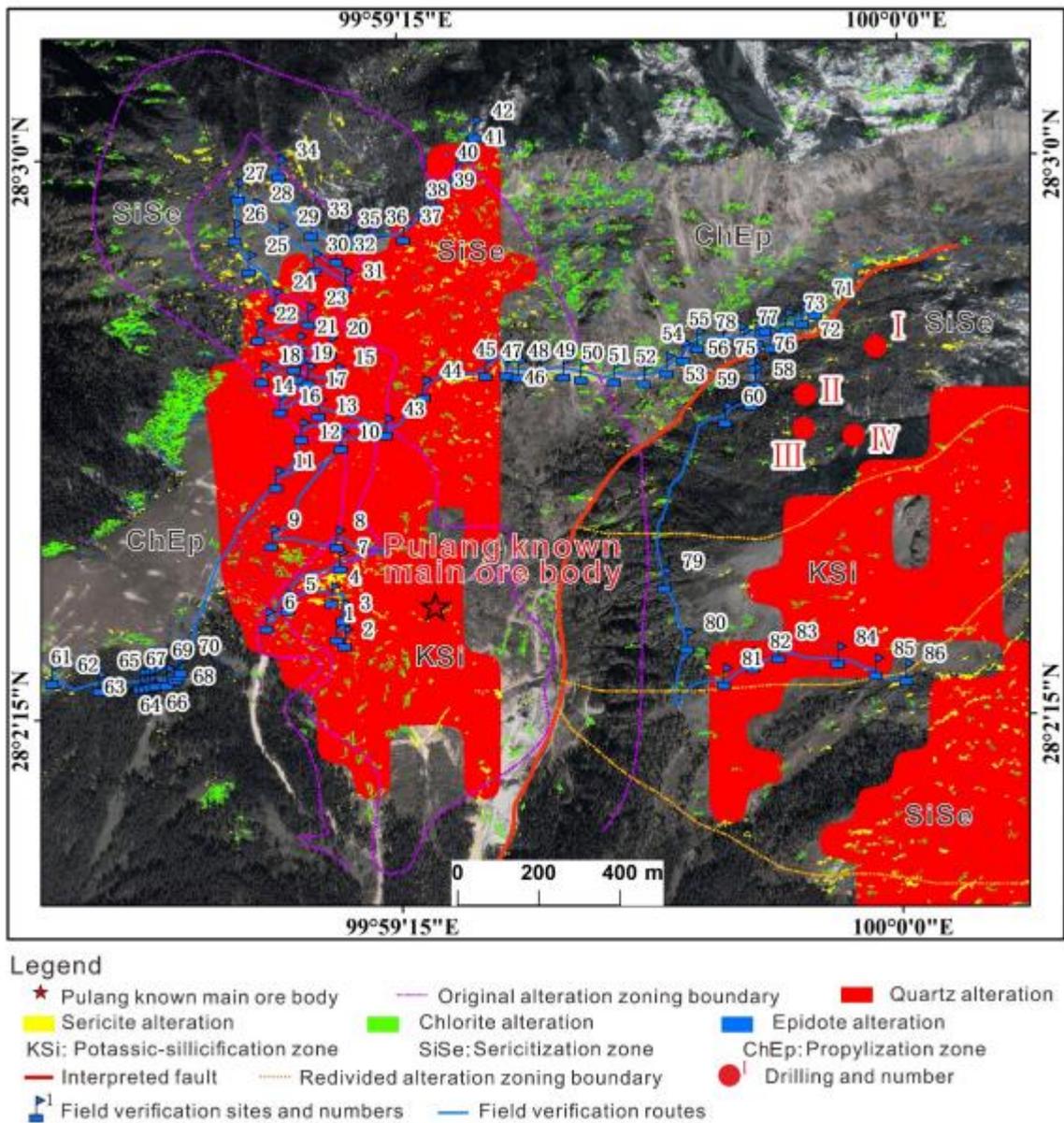


Рис. 8. Перераспределение зональности PCD Пуланга.

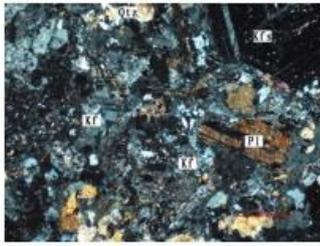
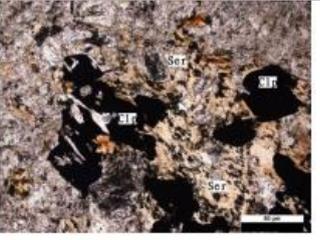
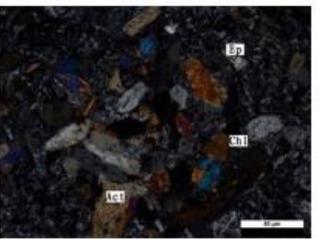
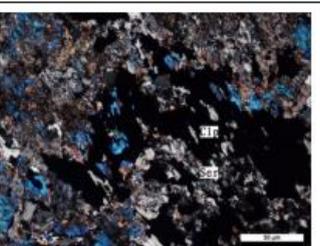
Сравнение полученных изменений минералов с исходной границей зоны изменений показывает, что распределение изменений кварца, серицита, хлорита и эпидота в главном рудном теле Пуланга в основном соответствует исходной зональности. Однако в восточной части основного рудного тела Пуланга, где зона изменения классифицируется как пропилитовая в соответствии с первоначальным картированием изменений, было добыто большое количество изменений минералов (кварца и серицита), относящихся к зонам калийно-окремненной и филлитовой.

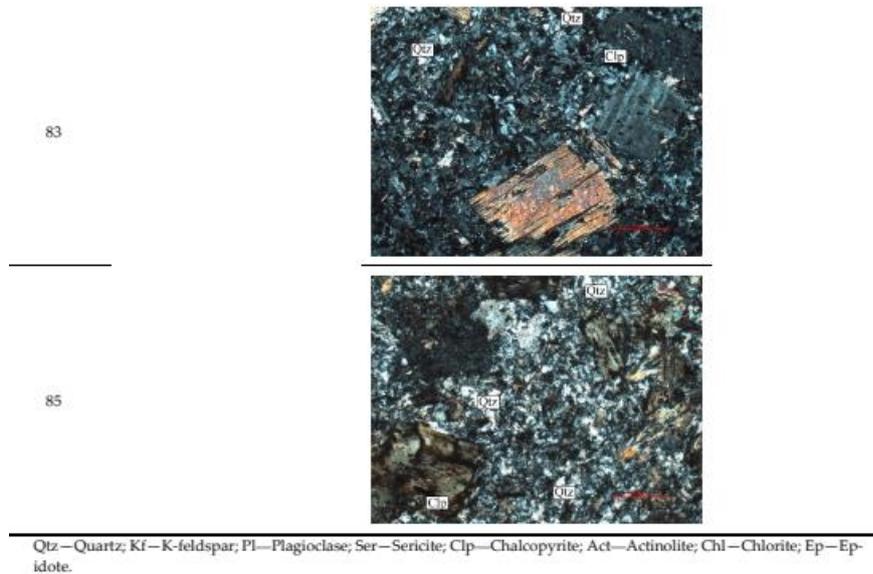
В сочетании с прогнозируемым следом разлома, основное рудное тело Пуланга составляло верхнюю стенку разлома, в то время как область на восточной стороне разлома составляла нижнюю стенку, а главное рудное тело Пуланга переместилось с восточной стороны разлома в нынешнее положение. Предполагается, что в PCD Пуланг есть два центра изменения минерализации, которые расположены по обе

стороны разлома, и что оба они демонстрируют зональные характеристики калийно-кремнистых, филлитовых и пропилитовых изменений от внутренних к внешним. Желтая линия на рисунке 8 является заново установленной границей изменений.

Чтобы проверить повторное зонирование изменений было проведено полевое опробование на 86 пунктах. Этот процесс включал определение местоположения по GPS, идентификацию литологии, сбор образцов и фотосъемку, а также петрографический анализ собранных образцов (табл. 6).

Табл. 6. Полевое проверочное обследование зональности изменений.

Field Verification Point No.	Detected Alteration Mineral	Alteration Zoning Divided by the Original Alteration Mapping	Petrographic Analysis Photo	Analysis of the Redivide Alteration Zoning
43	Quartz	Potassic-silicification zone		Potassic-silicification zone, abundant quartz, and K-feldspar content.
47	Sericite	Phyllic zone		Phyllic zone, abundant sericite, and chalcopyrite content.
51	Chlorite, Epidote	Propylitic zone		Propylitization zone, abundant chlorite, epidote, and actinolite content.
59	Sericite	Propylitic zone		Phyllic zone, abundant sericite, and chalcopyrite content.
82	Quartz	Propylitic zone		Potassic-silicification zone, abundant quartz, and chalcopyrite content.



Полевые контрольные точки 43, 47 и 51 относятся к повторно выделенным калийно-окремненным, филлитовым и пропилитовым зонам соответственно, что согласуется с предыдущим распознаванием. Полевые исследования и петрографический анализ показывают, что полевые контрольные точки 43, 47 и 51 имеют характеристики изменений калийно-окремненных, филлитовых и пропилитовых зон соответственно.

Полевые проверочные пункты 59, 82, 83 и 85 не соответствуют предыдущему составлению карт изменений. Точка 59 относится к филлитовой зоне, а точки 82, 83 и 85 к калийно-окремненной зоне, что не согласуется с определением их классификации как пропилитовой зоны при предыдущем картировании. Петрографический анализ показывает, что образец, собранный в точке 59, имеет характеристики изменений филлической зоны, а образцы, собранные в точках 82, 83 и 85, демонстрируют характеристики изменений калийной зоны окремнения.

5.3.4 Определение потенциальных поисковых участков.

Как известно, калийно-окремненные и филлические зоны являются важными индикаторами для поисков порфировой меди. Поэтому, повторно выделенные калийно-окремненные и филлические зоны в восточной части главного рудного тела Пуланга обладают поисковым потенциалом, в частности, граница калийно-окремненных и филлических зон. Для заверки здесь было пробурено несколько скважин (рис. 8). Согласно предыдущему составлению карты изменений, эта область относится к пропилитовой зоне и формирование оруденения ограничено. Однако анализ данных бурения показывает наличие медной минерализации на глубинах, причем содержание меди увеличивается с 0,1 до 0,4% в керне скважин 1-4 (рис. 9), постепенно приближалось от филлической зоны к зоне калиевых изменений и окремнения.

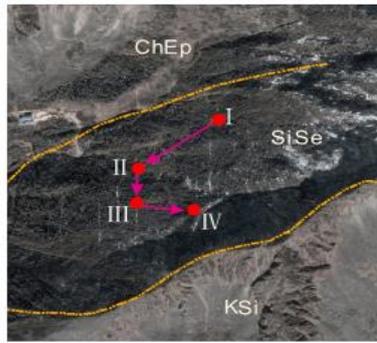


Рис. 9. Корреляции между четырьмя скважинами и новой зональностью изменений. I–IV: номера скважин; KSi: зона калиевого кремнения; SiSe: филлитовая зона; ChEp: пропилипвзация зона.

Обогащение медной минерализацией в скважинах 1, 2 начинается на глубине примерно 200 м, на глубине 80 м в скважине 3 и с поверхности в скв. 4. Таким образом, приведенный выше анализ подтверждает надежность повторного зонирования изменений.

Таким образом, благодаря анализу гидротермально-метасоматических изменений, с помощью данных ASTER и WV-3 в Pulang PCD, получены новые данные о металлогенической структуре и пространственном распределении зон изменений:

- Был обнаружен новый рудоперспективный разлом СВ простирания.
- Была скорректирована зональность изменений с выделением двух центров по обе стороны от разлома.
- На стыке повторно выделенных калийно-окремненных и филлических зон были очерчены перспективные участки для поисков.

6. ГРП НА УРАНОВОМ ПРОЕКТЕ ОЗЕРА ХУК [7]. (бассейн Атабаска, Канада)

6.1 Геологическая обстановка.

Проект Хук-Лейк расположен в юго-западной части бассейна Атабаска, Саскачеван (рис. 1). Бассейн Атабаска состоит из Атабаскской супергруппы недеформированных и плоско залегающих, в основном речных терригенных осадочных пород. Эта группа несогласно залегает на породах кристаллического фундамента провинции Рэй в западной половине бассейна и провинции Херн на востоке. Девонские и меловые осадочные породы налегают на юго-западный угол бассейна, а четвертичные ледниковые образования покрывают большую часть бассейна.



Рис. 1: Геологическая схема Северного Саскачевана

Породы магматической зоны Талтсон простираются от Северо-Западных территорий до северо-востока Альберты и северо-запада Саскачевана, а затем продолжают под бассейном Атабаски до домена Талтсон, состоящего из серии гранулитовых фаций метаморфических гранодиоритовых, гранитных, габбровых, слоистых кварцсодержащих гнейсов с подчиненным количеством анортозитов, кварцитов и пелитовых гнейсов.

Домен Талтсон включает урановые месторождения Клафф-Лейк, Ши-Крик, озера Паттерсон (проекты Эрроу, Трипл-Р и Спитфайр) и Драконьего озера (Мейбель).

После трансгудзонского орогенеза (около 1,8 млрд лет) породы фундамента были подняты с возрастом ретроградного метаморфизма от 1,75 до 1,78 млрд лет. После эксгумации породы фундамента подверглись эрозии, оставив выветренный профиль, сохранившийся в настоящее время в виде палеореолита. В общем смысле палеореолит состоит из гематизированной красной зоны, за которой следует переходная гематит-хлоритовая красно-зеленая зона и нижележащая зеленая зона с

преобладанием хлорита. Мощность палеореолита различна, но обычно составляет 10-30 метров.

Супергруппа Атабаска состоит из четырех неметаморфизованных региональных бассейнов, заполненных преимущественно флювиалитовыми песками и гравием. В проекте озера Хук находится наложенный бассейн Кри, содержащий супергруппу Атабаска (рис. 2).

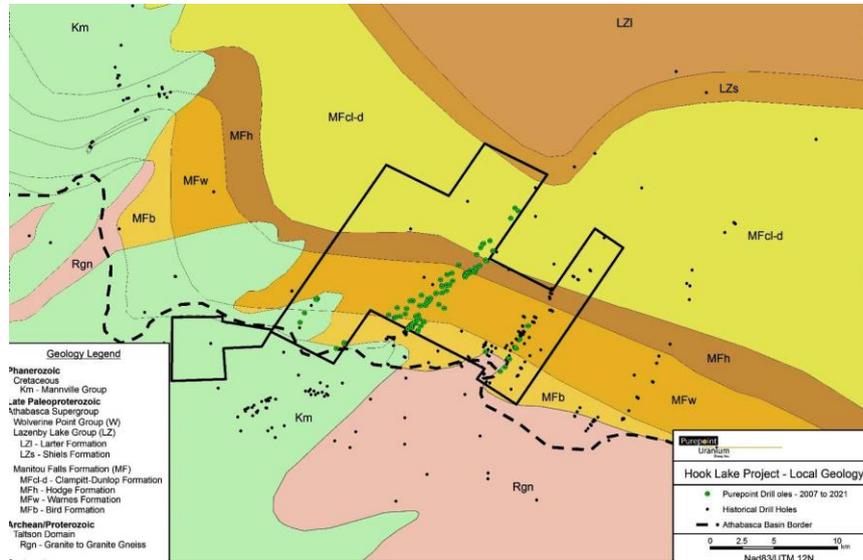


Рис. 2 Схема проекта Хук-Лейк.

Меловая группа Mannville присутствует в большей части проекта и состоит в основном из песчаника с прослоями алевритистых сланцев. Мощность ледниковых отложений четвертичного возраста варьируется от нуля до более 100 метров.

В литологии фундамента (рис. 7) преобладает многофазный ортогнейсовый комплекс, состоящий в основном из диоритов и гранодиоритов. Малые фазы ортогнейсового комплекса включают кварц-монцодиорит, кварц-диорит, тоналит, габбро и анортозит. Ортогнейсовый комплекс прорезан как минимум двумя генерациями основных даек и силлов. Карбонатиты и связанные с ними ультраосновные породы встречаются в виде силлов и даек.

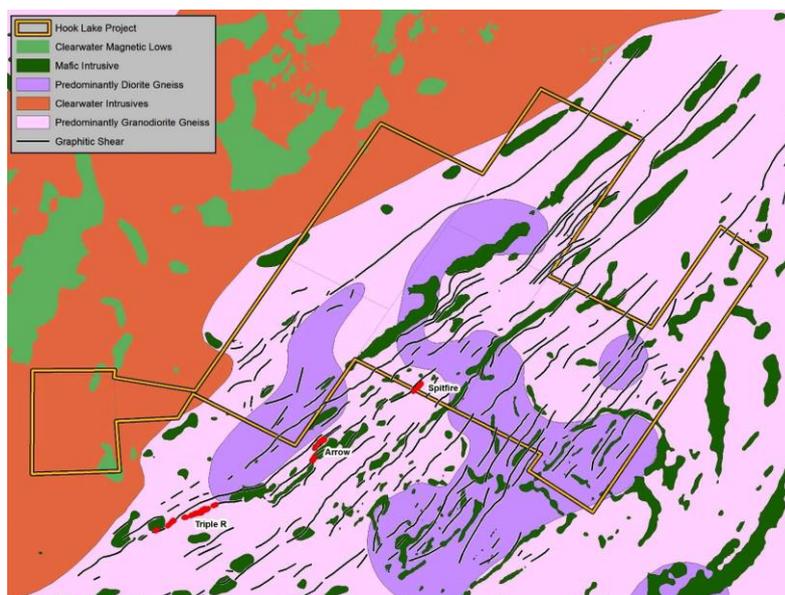


Рис. 3 Геология фундамента проекта Хук-Лейк.

Структура проекта Хук-Лейк, состоит из зоны сдвига, которая местами сильно графитизирована. Напряжения преимущественно концентрируются вдоль литологических контактов, особенно между хлоритизированными базитовыми дайками и вмещающими породами ортогнейса. Урановая минерализация чаще всего встречается в виде пологопадающих рудных столбов на верхнем контакте зон графитового рассланцевания.

6.2 Урановое оруденение.

В бассейне Атабаска находятся крупнейшие в мире месторождения урана. В м-нии Сигар-Лейк содержание урана ~ 15%, в Макартур-Ривер ~ 22% урана, а среднее содержание урана в других 30 м-ниях, связанных с несогласием, составляет ~ 2%, что примерно в четыре раза выше среднего содержания австралийских м-ний несогласия. Месторождения расположены вокруг субатабаскского несогласия и залегают как в песчаниках группы Атабаска над несогласием, так и в подстилающем фундаменте палеопротерозойских метаморфизованных пород и интрузивов.

Первоначальные открытия были сделаны с помощью поверхностных индикаторов, таких как радиоактивные валуны, сильные геохимические аномалии в окружающих озерах и болотах и геофизические признаки. После открытия месторождений Ки-Лейк была разработана модель поисков, нацеленная на электромагнитные проводники, связанные с нижележащими графитовыми сланцами.

Ураноносные зоны структурно контролируются как субатабаскским несогласием, так и зонами разломов в фундаменте и песчаниках. Они обычно локализуются внутри или вблизи графитовых пелитовых гнейсов, которые обычно примыкают к архейским

гранитоидным куполам. М-ние Киггавик является примером формирования без графитовых единиц. Урановые месторождения, которые связаны с небольшим количеством графита или вообще не связаны с ним, включают Rabbit Lake, Raven, Horseshoe, Cluff Lake и Centennial.

Урановые м-ния в бассейне Атабаска можно охарактеризовать как полиметаллические (U-Ni-Co-Cu, Pb, Zn и Mo) или монометаллические.

Рудопроявление Спитфайр.

В 2015 г. была обнаружена урановая минерализация Spitfire с высоким содержанием золота (рис. 4, 5). Минерализация находится в фундаменте, чехол - менее 150 м песчаника. Объект Спитфайр имеет северо-восточное простирание, протяженность около 350 м и мощность до 30 м. Минерализация расположена в зоне сдвига, богатой графитом.

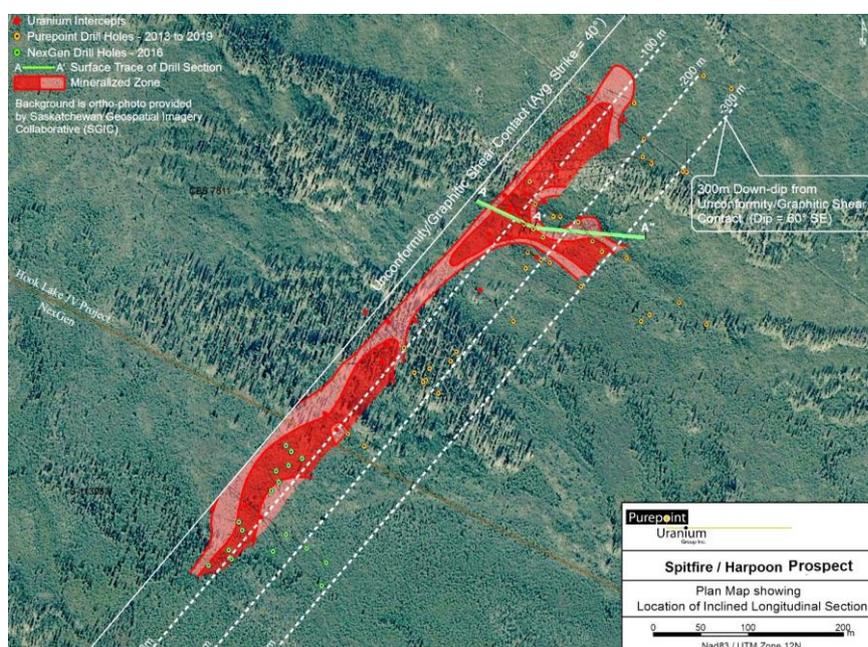


Рис. 4 Схема Spitfire/Harpoon Uranium Prospect

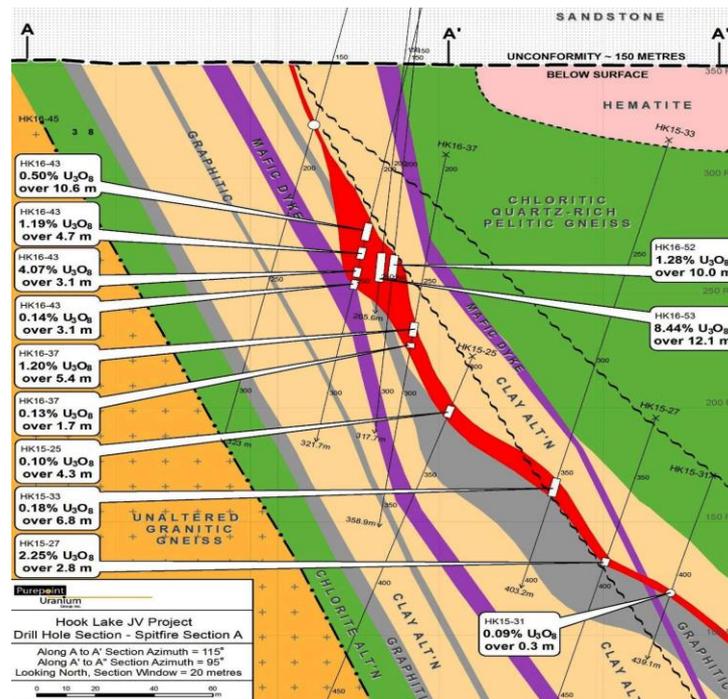


Рис. 5 Разрез уранового проявления Спитфайр.

Оруденение Спитфайр расположено вдоль зон сильного реологического контраста между верхней зоной рассланцевания и окремненными гнейсами, а также на контакте зон рассланцевания с вышележащими окремненными пиритизированными гнейсами в пределах изгиба графитового кондуктора и сопровождается обширными изменениями, характеризующимися истощением кварца, обогащением хлоритом и местами графитом.

Минерализация верхней зоны смятия состоит из хлоритизированных милонитовых пород, в которых преобладают филлосиликаты. Локально некоторые окислительно-восстановительные фронты накладываются на пластичную ткань, особенно ближе к несогласию. Зона сдвига локально затронута более поздней стадией хрупкой деформации. Брекчии могут развиваться вблизи основных даек и пересекать зону сдвига. Вне зоны окисления, вблизи кровли зоны рассланцевания на границе с окремненными гнейсами оруденение вкрапленное. В зоне окисления происходит ремобилизация оруденения с образованием ботриоидного уранинита. Оруденение в пределах гнейса проявляется в виде прожилок оксида урана, подобных жилам в зоне рассланцевания, шириной до сантиметров, а также в виде микрожил, секущих кварц с распространением оруденения из жилы в слоистость. Оруденение имеет более высокую степень в интервалах рассланцевания, чем в ортогнейсе.

Минерализация нижней зоны расположена на контакте богатого пиритом окремненного гнейса и подошвы сильно хлоритизированной основной дайки. Дайка расположена между гнейсом и зоной графитизации. Текстуры показывают белые

обломки аргиллитового материала в темно-зеленой матрице хлорита и зерна хлорита, которые хорошо развиты и ориентированы в том же направлении. Края глинистых обломков демонстрируют текстуры растворения, а окремненные гнейсы, богатые пиритом, также демонстрируют сильное растворение вблизи дайки. Растворение влияет как на кварц, так и на пирит и, по-видимому, происходит из-за трещин, пересекающих слоистость. Оруденение как в окремненных гнейсах, так и в дайке рассеяно внутри филлосиликатов и связано с пиритом. Нижняя минерализованная зона имеет более низкое содержание по сравнению с верхней частью рудного тела.

Месторождение Эрроу.

Объект расположен вдоль юго-западного края бассейна Атабаска вдоль коридора озера Паттерсон (рис. 3). На месторождении Эрроу разведаны измеренные минеральные ресурсы в 2,18 млн тонн с содержанием U_3O_8 4,35%, выявленные минеральные ресурсы в 1,57 млн тонн с содержанием U_3O_8 1,36%, и предполагаемые минеральные ресурсы в 4,40 млн тонн с содержанием U_3O_8 0,83%.

М-ние Эрроу состоит из нескольких уложенных друг на друга линз, образующих зону шириной 308 м с общей протяженностью по простиранию 970 м. Оно начинается на 110 м от поверхности и простирается до глубины 980 м. Урановая минерализация приурочена к сильно графитизированным ортогнейсам в пределах дискретных зон сдвига.

Месторождение Triple R.

Оно также расположено недалеко от юго-западного края бассейна Атабаски вдоль коридора озера Паттерсон (рис. 3). На месторождении выявленные минеральные ресурсы составляют 2,22 млн тонн с содержанием U_3O_8 2,1%, и предполагаемые минеральные ресурсы в 1,22 млн тонн с содержанием 1,22% U_3O_8 .

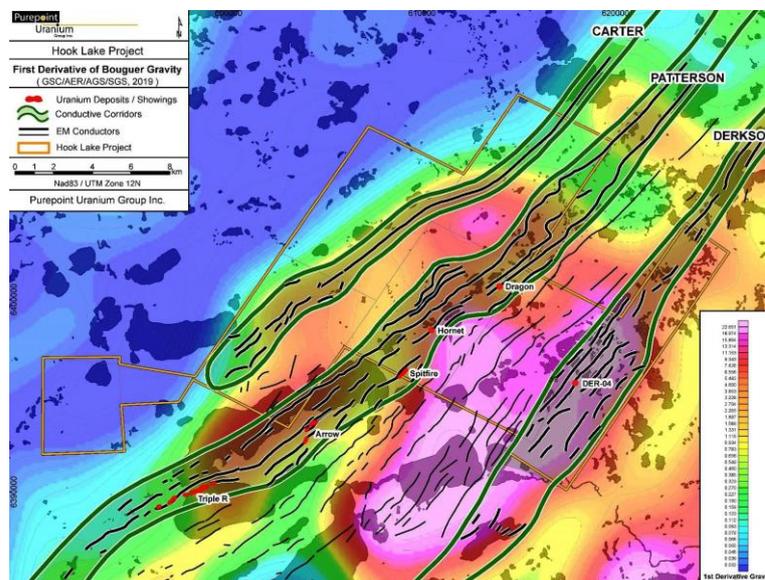


Рис. 6 Структурные/проводящие коридоры с фоном 1-й производной гравитации

Породы фундамента перекрыты девонскими и меловыми отложениями, песчаников группы Атабаска на объекте не обнаружено. Урановая минерализация выявлена в метаморфизованных породах фундамента в пределах или вблизи главной зоны сдвига на протяжении 3,2 км по простиранию вдоль электромагнитного проводника (рис. 6). Наиболее распространенным типом минерализации являются мелкозернистые, вкрапленные и заполняющие трещины урановые минералы, которые тесно связаны с графитом. Они согласуются с региональной слоистостью и доминирующими структурными тенденциями. Оруденение связано с интенсивными серо-зелеными изменениями хлорита и глины (каолинит, sudoит). Интенсивные лимонит-гематитовые изменения в ортогнейсах коррелируют с высоким содержанием урана.

Поисковые критерии.

Основываясь на минерализации в Спитфайре, ближайших месторождениях Эрроу и Трипл-Р, а также общей геологической модели урановых месторождений «несогласия», текущие поиски урана в рамках проекта Хук-Лейк будут направлены на:

- (1) участки с графитовыми породами фундамента;
- (2) возможные сквозные структуры;
- (3) обширные зоны изменений в породах фундамента или чехла;
- (4) ореолы повышенных содержаний урана;
- (5) высокие концентрации элементов-спутников (U, Ni, As, Co, B, Cu, Mo, Pb, Zn и V);
- (6) близость к поверхности несогласия в фундаменте, выше или ниже его;
- (7) зоны повышенной трещиноватости песчаников чехла.

6.3. Программы ГРП.

С 2007 по 2021 год поиски на участке Хук-Лейк, проводимые Purepoint Uranium Group Inc., включали: геохимическую съемку почвы, повторную интерпретацию исторических данных, аэрогеофизическую съемку, наземные геофизические исследования и алмазное бурение.

6.3.1 Геохимические исследования.

Компания Purepoint провела геохимическую съемку - 250 проб на West Grid в рамках проекта Hook Lake Project в октябре 2011 года. Исследование включало отбор проб гумусового горизонта A1 и анализ ICP-MS в пределах участков, где мощность вскрышных пород превышает 75 м.

Сетка отбора проб была разработана и загружена в GPS перед отправкой в поле. Мощность горизонта A1 варьировала от 1 до 6 см. Все образцы были описаны - процентное содержание торфа, процентное содержание древесного угля и цвет почвы. Метод анализа - как ICP-MS, так и ICP-OES. Образцы просеивали до 180 микрон, затем анализировали после частичного (двухкислотного) и полного (трехкислотного) расщепления. Частичное расщепление было предложено как средство предотвращения помех, возникающих при проведении ICP-MS на полностью переваренных образцах. Для частичного расщепления 0,250 г пульпы вываривали с 2,25 мл сверхчистой HNO_3 : HCl (8:1) в течение 1 часа при 95°C . Для полного расщепления 0,125 г пульпы нагревали в смеси сверхчистой $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ до высушивания, а остаток растворяли в разбавленной HNO_3 .

Четырнадцать полевых проб для контроля качества были отобраны случайным образом в районе исследования. Лабораторные меры контроля качества включали шестнадцать лабораторных стандартов (специфичных для аналитического метода) и восьми повторных образцов.

Дублированные образцы были просмотрены с использованием диаграмм рассеяния данных дублирующих образцов по сравнению с данными исходных образцов. Результаты были математически подтверждены путем расчета и построения графика относительной процентной разницы между дублирующими и исходными образцами в зависимости от концентрации в исходном образце. Были рассмотрены только дубликаты данных по элементам, которые действительно были идентифицированы как имеющие поисковое значение.

Лаборатория SRC использовала разные стандарты во время анализа проб. Анализ результатов анализа стандартов показал, что воспроизводимость соответствующих элементов была достаточно хорошей.

Для построения графика были выбраны элементы, обычно связанные с урановой минерализацией, а именно U, Ni, Co, V, Mo, Pb, As, Cu, Zn, Ba, Sr, Hg и W. На содержание урана и никеля незначительно влияет органическое содержание, поэтому эти элементы были регрессированы по LOI, а остаточные значения нанесены на график. Было замечено, что графики необработанных результатов по сравнению с остатками для этих двух элементов имеют лишь незначительные различия.

Результаты по остаточному урану показывают слабую тенденцию север-юг, коррелирующую с четырьмя из пяти высоких остаточных значений (рис. 7). Слабый тренд урана с севера на юг проявляется в результатах по ванадию и свинцу и, в меньшей степени, по барии и цинку.

Для никеля самые высокие концентрации обнаружены вблизи скважины DER-04 (рис. 7). Самые высокие концентрации кобальта и стронция также были обнаружены в районе DER-04. Медь и цинк вернули свои наибольшие концентрации с западной стороны сетки отбора проб.

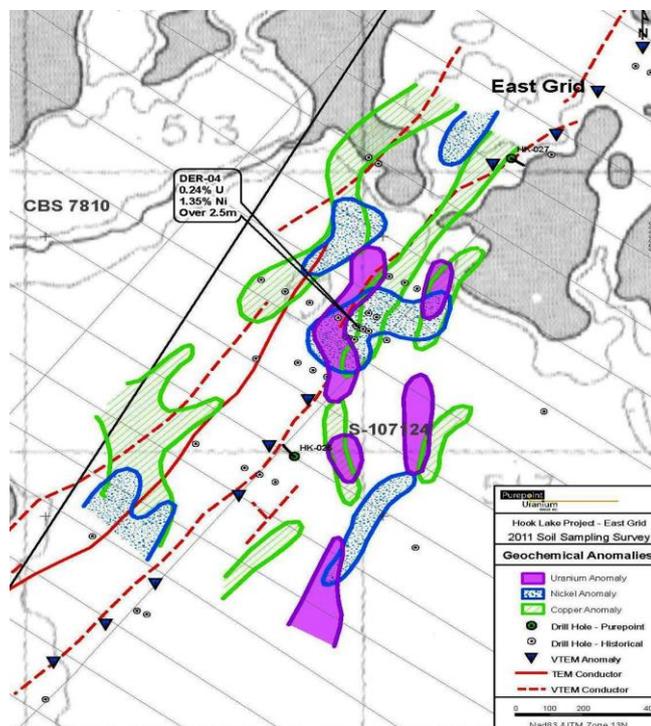


Рис. 7 Карта почвенных аномалий U, Ni и Cu

Геохимическая съемка проверила полезность анализа гумусового горизонта A1. По результатам не наблюдалось четкого аномального тренда. Результаты по меди могут отражать общий северо-восточный тренд, аналогичный нижележащим электромагнитным проводникам, но, по-видимому, они плохо коррелируют с геохимическими признаками урана и никеля. Аномальные концентрации всех трех этих элементов встречаются в непосредственной близости от скважины DER-04.

6.3.2 Аэрогеофизические исследования.

Компания Condor Consulting провела анализ результатов аэромагнитных исследований VTEM. Кондор перестроил имеющиеся данные, всего 12 наборов данных, и объединил результаты в мозаику с высоким разрешением (размер ячейки 50 м). Затем были произведены магнитные производные продукты для усиления магнитных границ и текстурных доменов. Чтобы устранить предвзятость интерпретатора, был использован полуавтоматический процесс для определения положения и протяженности источников магнитного поля с использованием угла наклона магнитного поля. Затем выходные данные были преобразованы в полигоны с определенными интервалами и использованы в качестве основы для интерпретации структурных элементов (рис. 8).

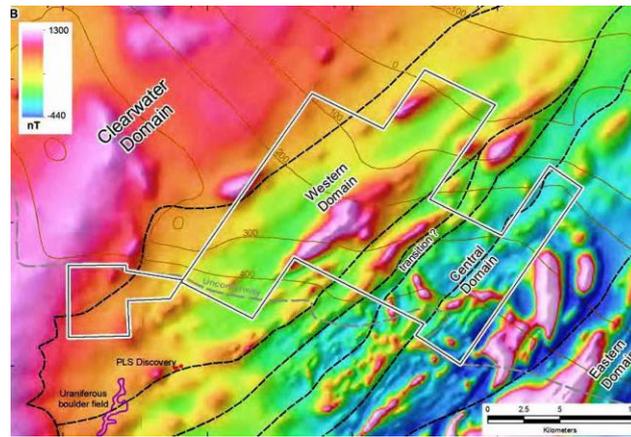


Рис. 8 Схема Total Magnetics с интерпретируемыми структурными элементами (Condor, 2013)

Области, интерпретированные на основе геофизических продуктов, представлены с полным магнитным полем и магнитной производной наклона на рисунке 9.

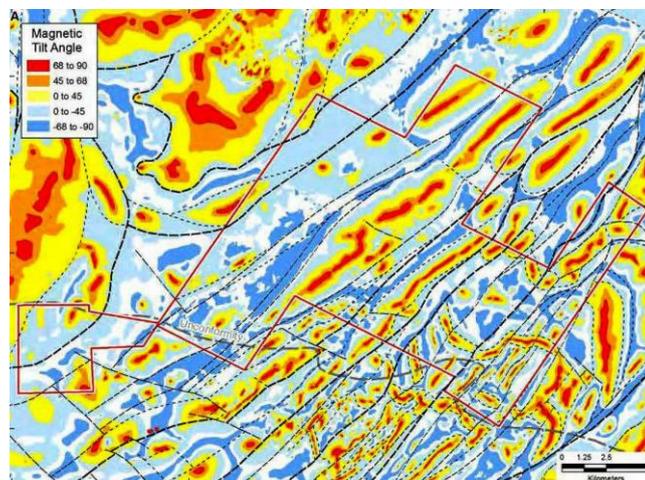


Рис. 9 Магнитный наклон со структурной интерпретацией.

Западная область демонстрирует отчетливое изменение магнитного характера и стиля складок, которое видно по границам ее доменов. Западный домен характеризуется линейной магнитной тканью, интерпретируемой как отражение плотных, вертикальных или слегка перевернутых на северо-запад складок, которые, возможно, являются антиформами, ограниченными разломами. М-ние теперь известное как месторождение Triple R расположено в Западном домене, а проводящий структурный коридор озера Паттерсон образует юго-восточную границу субдомена, характеризующегося линейными, полунепрерывными электромагнитными проводниками.

Оси проводника расположены между крупными антиформами с двойным погружением. Сегментированные оси проводников предполагают незначительное боковое смещение («поперечные структуры»). Центральная область, в отличие от западной, характеризуется дискордантными и наклонными магнитными трендами, интерпретируемыми как отражение более открытого стиля складчатости. Оси

проводников прерывистые и частично наклонены к магнитной ткани, таким образом, потенциально структурное, а не стратиграфическое происхождение (графитовые сдвиги?). Несколько дискретных доменов очерчены на основе магнитных тканей и очевидного структурного стиля.

Таким образом, интерпретируется, что два отдельных домена пересекают участок Хук-Лейк, что отражает изменение структурной геометрии и стиля складок. В Западном домене есть несколько отдельных осей проводников, которые параллельны коридору озера Паттерсон и региональной магнитной ткани. Совпадение интерпретируемых структур (разломных антиформ) и проводников большой протяженности в Западном домене считается благоприятным для нацеливания поискового бурения. Восточный домен содержит менее перспективные структуры.

Правильное расположение электромагнитных проводников считается критически важным для текущих программ в рамках проекта, поскольку открытия урановых объектов Triple-R, Agrow и Spitfire связаны с графитовыми породами. Район был повторно исследован чтобы: 1) подтвердить расположение электромагнитных проводников, 2) обеспечить лучшие данные электромагнитной совместимости с использованием новейших технологий, и 3) определить положение новых проводников, которые могут проходить параллельно историческим электромагнитным съемкам, путем прохождения дополнительных линий СВ-ЮЗ.

Компания Geotech провела электромагнитную съемку с вертолета с использованием универсального электромагнитного прибора во временной области (VTEMplus) с системой записи данных с полным приемником и потоковой формой волны с измерениями компонентов Z и X и горизонтальным магнитным градиентометром с использованием двух цезиевых магнитометров. Всего в ходе съемки было получено 226 пог. км геофизических данных. Проект Hook Lake был выполнен в направлении с юго-востока на северо-запад с расстоянием между линиями траверса 50 и 100 метров (рис. 10).

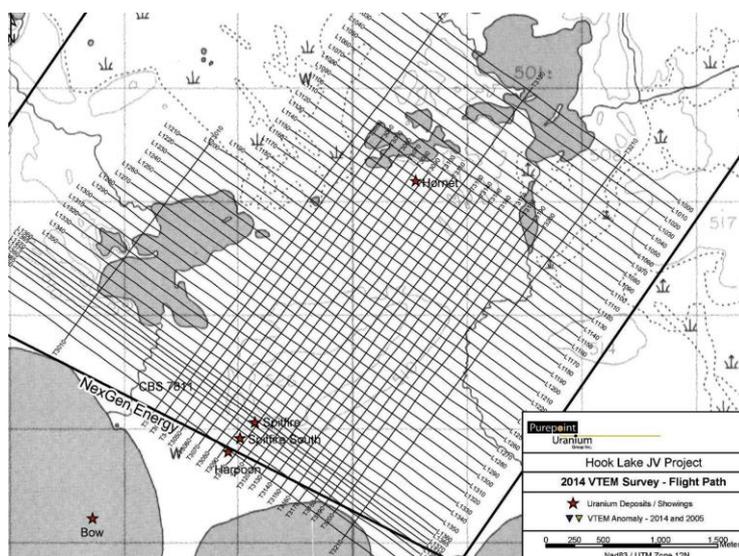


Рис. 10 Линии полета – съемка VTEM.

Связи были проложены перпендикулярно траверсным линиям на расстоянии 100 и 1000 метров. Во время VTEM-съемки вертолет находился на средней высоте 79 м над землей с номинальной съемочной скоростью 80 км/ч. Это позволило обеспечить номинальный клиренс электромагнитного датчика в 40 метров и клиренс магнитного датчика в 55 метров.

Скорость записи данных составляла 0,1 секунды для электромагнетометра, магнитометра и 0,2 секунды для альтиметра и GPS, что соответствует геофизическим показаниям примерно каждые 2 метра вдоль траектории полета. В качестве навигационной системы использовалась навигационная система на базе Geotech PC104, использующая GPS-приемник NovAtel WAAS (Wide Area Augmentation System), который сообщает GPS-координаты в виде широты/долготы и направляет пилота по предварительно запрограммированной геодезической сетке.

Прибор VTEM представляет собой передатчик импульсного типа или передатчик во временной области с горизонтальной концентрической конфигурацией катушки приемника/передатчика. Аномалия, которую обеспечивает этот прибор, различна для каждого типа формы проводника. Purepoint идентифицировала только аномалии «Типа 1», которые являются откликом от тонкой пластины (<30 метров) и показывают два пика по обе стороны от центра пластины. Погружаемая пластина изменит симметрию аномалии, и отношение амплитуд двух пиков используется для расчета наклона. Размер символа, представляющего выборку аномалии VTEM, пропорционален количеству каналов, на которых может быть определена аномалия, и, следовательно, пропорционален произведению проводимости на толщину или проводимости.

Компания GeoTech также выполнила 3D-изображения удельного сопротивления по глубине (RDI), которое представляет собой метод, используемый для преобразования

данных затухания электромагнитного профиля в эквивалентное удельное сопротивление по сравнению с глубинным поперечным сечением. Алгоритм RDI, используемый для преобразования удельного сопротивления в глубину, основан на схеме преобразования кажущегося сопротивления Me_{ij} и отклике TEM от проводящего полупространства. Программа была разработана GeoTech и откалибрована по глубине на основе моделирования передней плиты для конфигурации системы VTEM.

Результаты съемки VTEM выявили сильные, умеренные и слабые электромагнитные аномалии (синие треугольники на рисунках 10, 11 и 12).

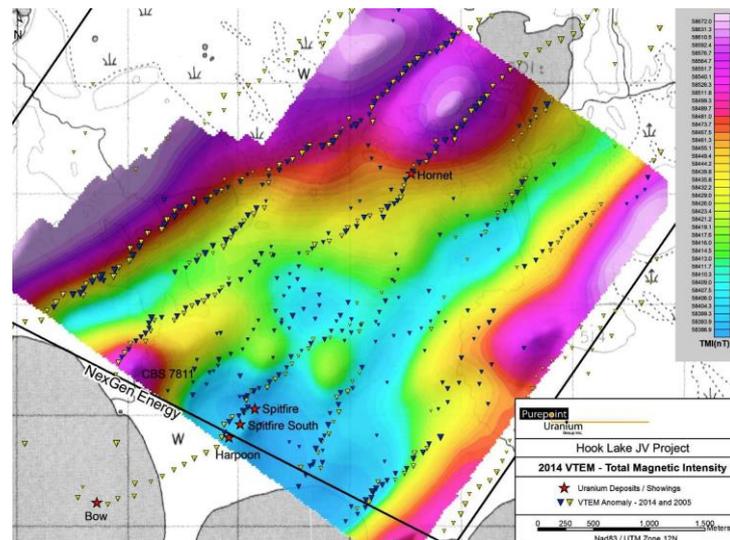


Рис. 11 Общая напряженность магнитного поля – съемка VTEM

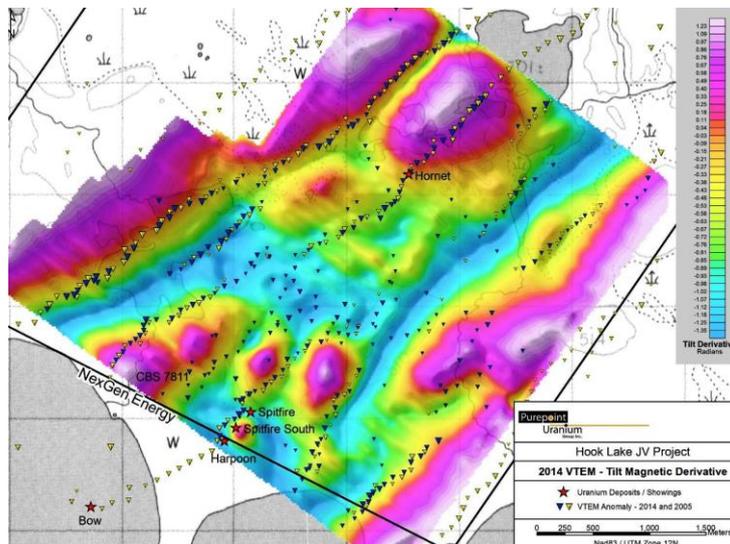


Рис. 12 Магнитная производная наклона – съемка VTEM

Сильные, четко очерченные аномалии с низким уровнем шума, вероятно, вызваны мощными непрерывными графитовыми полосами. Аномалии средней силы - отражают тонкие графитовые полосы. Плохо выраженные аномалии, некоторые из которых близки к уровню шума, все же демонстрируют некоторую линейную корреляцию,

считаются откликом от тонких, возможно вкрапленных полос графита или сульфидов. Район непосредственно к северу от Спитфайра считается имеющим слабые электромагнитные аномалии, трудно найти линейную корреляцию, поэтому они показаны как изолированные аномалии. Магнитные данные отображаются в виде общего магнитного поля (рис. 11) и производной наклона (рис. 12). Производная магнитного наклона рассчитывается как угол между первой производной по вертикали и горизонтали в каждой точке сетки, и ее значение находится в пределах от +1,57 до -1,57 радиан. Два разлома были интерпретированы по латеральным смещениям магнитных элементов и смещениям линейных проводников.

3D-изображение удельного сопротивления по глубине (RDI) данных VTEM было создано чтобы лучше отобразить общую проводимость фундамента и попытаться отобразить минимумы удельного сопротивления песчаника (рис. 13).

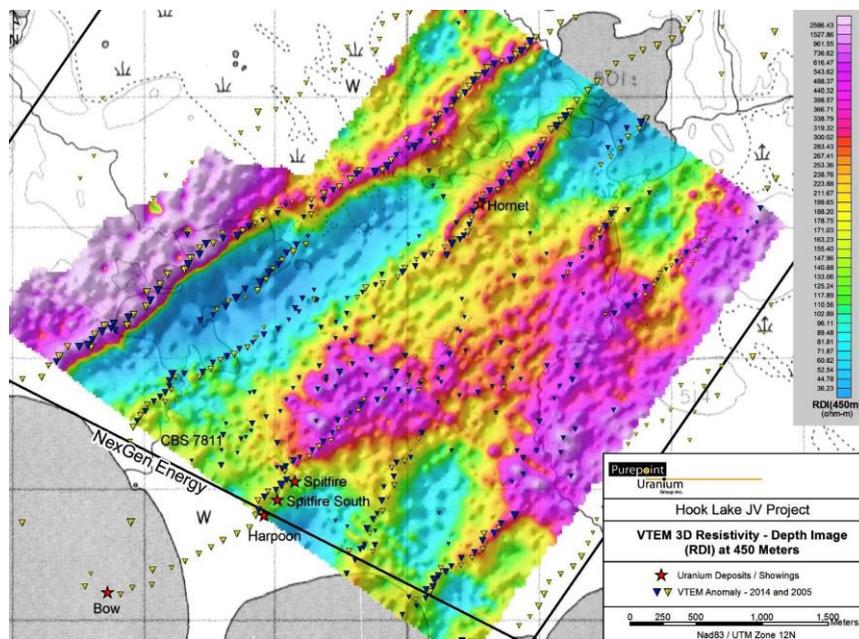


Рис. 13 Глубинное изображение удельного сопротивления (RDI) на глубине 450 метров.

RDI обеспечивают индикацию относительной глубины и вертикальной протяженности проводника. Сравнение разрезов RDI Geotech с разрезами наземной индуцированной поляризации показывает, что разрезы RDI правильно отображают максимумы удельного сопротивления, но имеют плохое разрешение минимумов удельного сопротивления. Сравнение показывает, что инверсия результатов аэросъемки для интерпретации изменений в песчанике не так надежна, как результаты наземной геофизики.

Для западного и центрального участков была выполнена съемка IP/сопротивления с градиентным массивом в качестве относительно недорогого геофизического метода для выбора перспективных зон в обширных системах проводников, указанных в

аэрофотосъемке VTEM. Было проведено 88 км градиентной съемки IP/сопротивления и 39 км полярно-дипольной съемки IP/сопротивления (рис. 14).

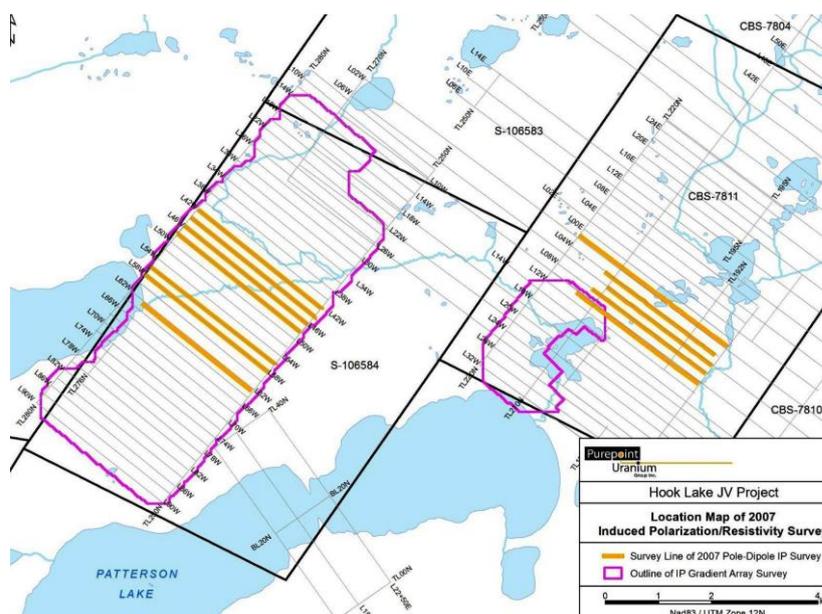


Рис. 14 Схема съемки поляризации/сопротивления.

Съемка ВП/сопротивления проводилась с использованием приемника ВП-сопротивления во временной области IRIS Instruments ELREC Pro, ВП-передатчика Walcer TX 9000 мощностью 9+ кВт и мотор-генератора Walcer MG-12. В качестве токовых и потенциальных электродов использовались стержни из нержавеющей стали.

Массив градиентных электродов включает в себя установку 2 электродов с бесконечным током примерно на расстоянии, равном длине линии съемки, параллельно обоим концам линии и вне их в центре области съемки. Два токовых электрода остаются фиксированными для нескольких линий съемки в обоих направлениях до тех пор, пока сигнал первичного напряжения не станет слишком слабым для получения надежных показаний. Два электрода с фиксированным током подключаются к передатчику с помощью проводов, на 2 электрода подается «прямоугольная волна», импульс 2 секунды с интервалом 2 секунды. Это создает относительно глубокий путь тока между двумя токоведущими электродами. Пара потенциальных электродов, прикрепленных к IP-приемнику Time Domain, перемещается вверх и вниз по линиям съемки, регистрируя эффект «IP» (заряжаемость) и значения кажущегося удельного сопротивления. Как показания заряда, так и показания кажущегося удельного сопротивления были записаны на каждой 25-метровой станции вдоль линий сетки с использованием потенциального расстояния между диполями 50 м, смещаясь каждые 25 м.

Съемка Pole-Dipole IP проводилась с разным расстоянием «а» или расстоянием между диполями, чтобы определить оптимальный компромисс между силой сигнала и

глубиной исследования. Большая часть съемки «полюс-дипольная антенна» проводилась с использованием 100-метрового расстояния между диполями и шестью «п» или диполями. Из-за чрезвычайно высокого импеданса заземляющих контактов вода и соль применялись к подвижному токоведущему электроду для увеличения выходного тока со смешанными результатами. Различные массивы и конфигурации электродов были испытаны на сети Hook West Grid для определения параметров, которые обеспечат наилучшие результаты, учитывая плохой контакт с землей и толстый слой песка/гравия.

Результаты кажущегося удельного сопротивления и поляризуемости, полученные в результате съемки градиентной группы IP на Западной площади, представлены на рисунке 15, а результаты на Центральной - на рисунке 16.

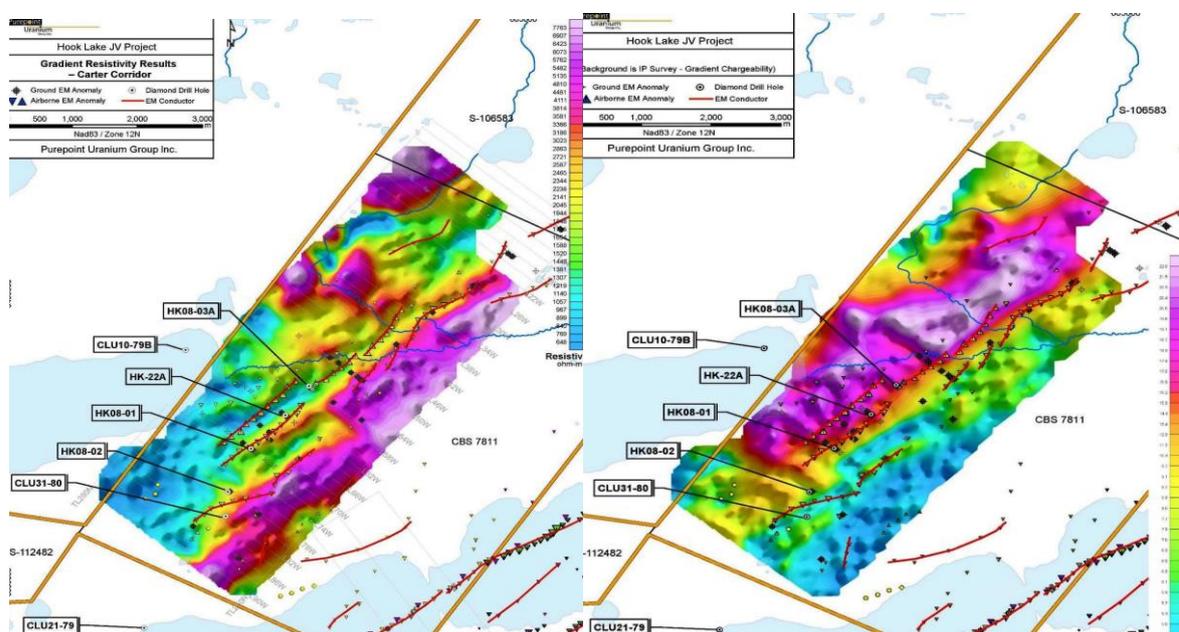


Рис. 15 Результаты градиента удельного сопротивления и градиентной зарядки.

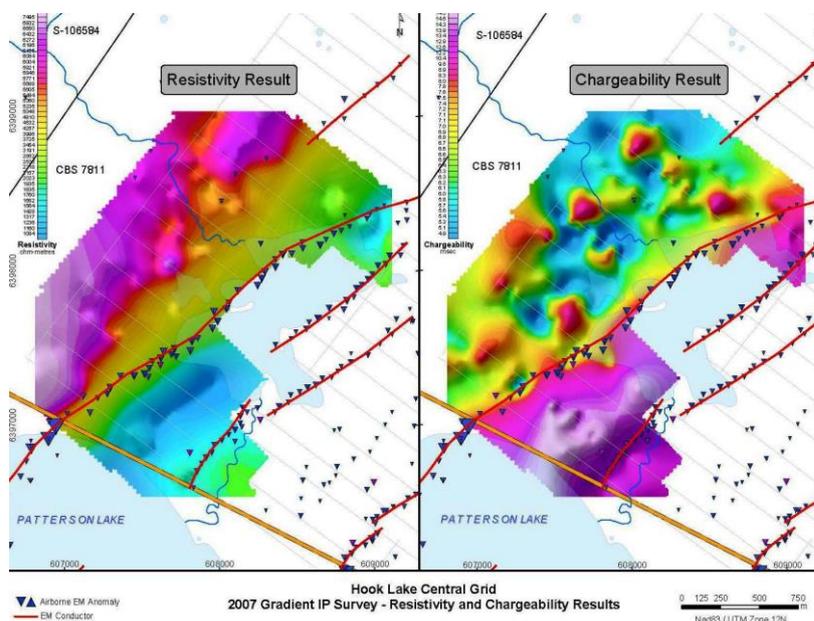


Рис. 16. Результаты поляризации, вызванной градиентом.

Результаты съемки градиентной группы как на Западной, так и на Центральной площадях предполагают, что оси проводников ВТЭМ образуют контакт между типами горных пород с противоположными электрическими и магнитными характеристиками. На Западной - проводящая и заряжаемая аномалии с высокой магнитной восприимчивостью лежат на северо-западе, а резистивная аномалия с низкой заряжаемой способностью и более низкой магнитной восприимчивостью - на юго-востоке. На Центральной – на юго-востоке и на северо-западе.

Для Западной площади может показаться, что ось проводника VTEM образует контакт между типами горных пород с противоположными электрическими и магнитными характеристиками. Проводящая и заряжаемая аномалия с высокой магнитной восприимчивостью лежит на северо-западе, а резистивная, малозаряжаемая с более низкой магнитной восприимчивостью лежит на юго-востоке. Идентификация этих аномалий – задача бурения.

Результаты съемки Центральной площади показывают зону низкого удельного сопротивления и высокой заряжаемости на юго-востоке съемки VTEM (рис. 16). В этом случае область к юго-востоку является заряжаемой и проводящей, а к северо-западу - высокого удельного сопротивления и низкой заряжаемости. Как и в случае с Западной площадью, ось проводника здесь, по-видимому, представляет собой контакт между типами горных пород с совершенно разными электрическими свойствами.

Съемка ВП с помощью полюсной дипольной антенны проводилась по семи линиям западной сети и пяти линиям центральной сети (рис. 14). Результаты съемки полюс-дипольной антенной решетки в виде суммированных профилей инвертированного удельного сопротивления для центральной сетки приведены в качестве примера (рис. 17).

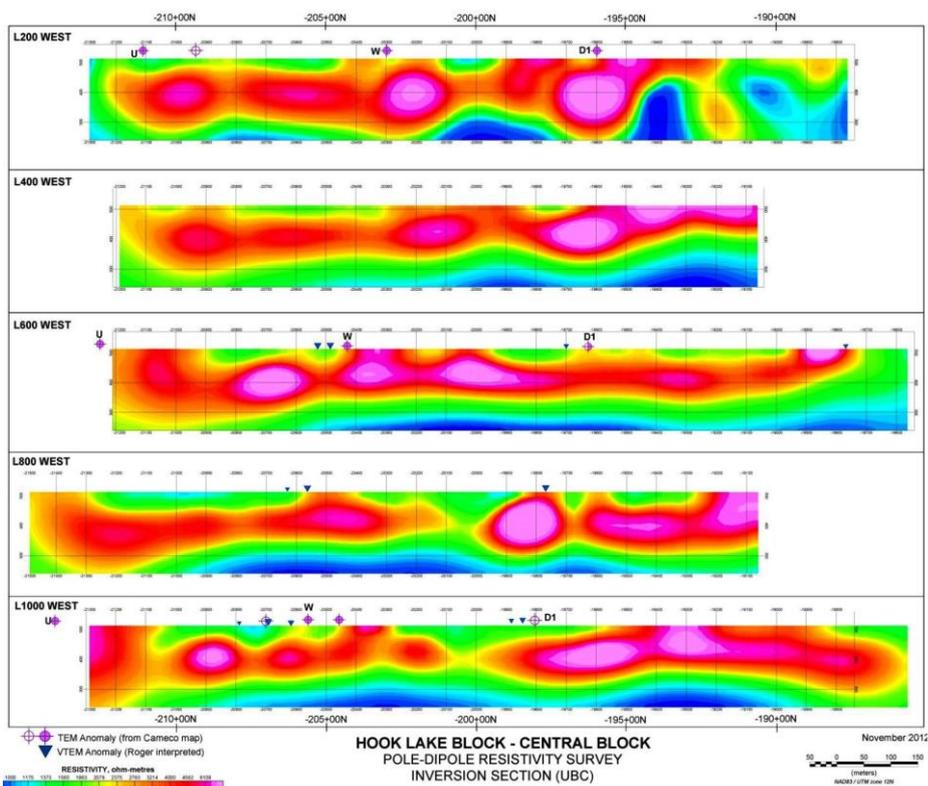


Рис. 17 Составные секции поляризации, вызванной полюсным диполем, — центральная сетка

Разрезы инверсии удельного сопротивления показывают, что глубина проникновения, достигнутая с интервалом «а» в 100 метров, составляет около 250 метров, что приблизительно соответствует средней суммарной мощности вскрышных пород и песчаника в этом районе.

Основное использование разрезов удельного сопротивления состоит в том, чтобы определить местонахождение аномалий с низким кажущимся сопротивлением, LARC, вблизи осей проводников ЭМ, что может указывать на ореолы изменений над графитовыми образованиями.

На центральной сети разрезы IP показывают тонкий поверхностный слой с низким удельным сопротивлением, средний слой с высоким удельным сопротивлением и глубокий слой с очень низким удельным сопротивлением (рис. 16). Сопоставляя результаты IP Центральной площади с результатами бурения скважины НК-23 на линии 1000W, вскрышная порода имеет низкое удельное сопротивление <2000 Ом-метров, песчаник от 3000 до более 6000 Ом-метров, а последний слой, зона выше несогласия, ниже 1500 Ом. Низкий результат проводимости считается вызванным наличием воды в пористом, несцементированном песке, который образует материал «без извлечения керна».

6.3.3 Наземные электромагнитные исследования

В общей сложности в рамках проекта Хук-Лейк было выполнено пять пошаговых съемок переходных электромагнитных процессов с подвижной петлей (SWMLTEM).

Эти электромагнитные съемки охватили примерно 100 км на западной и центральной площадях.

Съемка SWMLTEM состояла из нескольких фиксированных петель передатчиков, расположенных через определенные интервалы вдоль линий съемки (рис. 18).

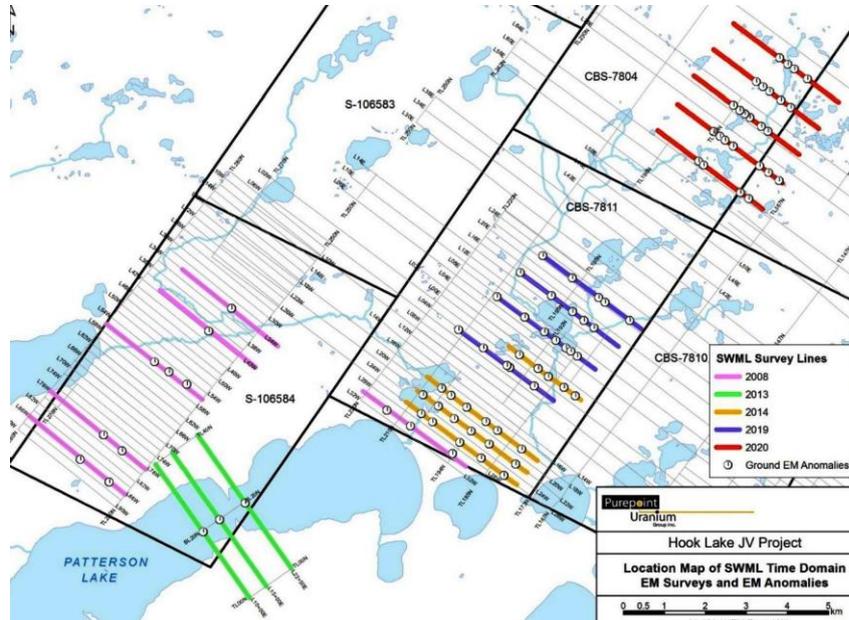


Рис. 18 Схема расположения пошаговых съемок TEM с подвижной петлей.

Данные собирались на нескольких станциях по профилям различной длины. Профили данных TEM, использующие разные контуры передатчика, частично перекрывают друг друга на одной и той же линии, так что показания на всех станциях имеют несколько основных направлений связи поля. Эти множественные наборы данных от разных контуров передатчика повышают достоверность интерпретации местоположения графитовых проводников.

Съемки SWMLTEM были выполнены компанией Quantec Geoscience с использованием 50-метрового интервала отбора проб с перемещением катушки передатчика на 200 метров. Размер передающей катушки на всех линиях составлял 200 x 400 метров. Инструментарий включал 20-канальный приемник Geonics Digital Protom, поверхностную катушку Geonics 3D-3 и передатчик Geonics EM-57 (выходная мощность 1,8 кВт).

Компания Patterson Geophysics Inc. использовала цифровые приемники ПЭМ Geonics Protom 37D, две приемные катушки 3D-3 и одну приемную катушку 1D-LF. Цифровые приемники TEM были развернуты на расстоянии 400 м и 600 м к северу от центров петель передачи для сбора данных с 50-метровыми интервалами между станциями по каждому профилю. Взаимное расположение приемников по отношению к центру петель передачи не менялось в ходе съемки, а весь массив Tx-Rx перемещался с шагом 50 метров между показаниями. Первичное нестационарное

магнитное поле для съемки было создано с использованием передатчика Geonics TEM57 MK2 и квадратных передающих петель размером 100 м x 100 м.

В съемках SWMLTEM использовались датчик катушки LF Geonics 3D-3 и приемник SMARTem24. Съемки проводились с интервалом между станциями 50 м и использованием передающих контуров 200 x 400 м вдоль ранее определенных линий сетки.

Съемка SWMLTEM на Хук-Лейк была проведена для проверки достоверности результатов аэросъемки и более точного определения местонахождения электромагнитных аномалий в качестве перспективных участков для бурения.

Были созданы и сглажены линейные профили, а также рассчитаны градиенты, чтобы помочь в выявлении аномалий в ключевых точках профилей.

Аномалии оценивались с точки зрения их качества как электромагнитных проводников и в связи с другими геофизическими данными. Интерпретация данных SWMLTEM считается очень хорошей, поскольку почти каждая выборка ЭМ, выбранная для буровых испытаний, успешно объясняется наличием графитосодержащей породы, пересеченной на прогнозируемой глубине.

6.3.4 Наземная гравитационная съемка.

В гравиметрической съемке компании MWH Geo-Surveys Ltd использовалась сетка GPS с интервалом между линиями 100 метров и контрольными станциями через каждые 100 метров. Всего было использовано 1472 станции и 85 повторений (не включая базовые связи) с доступом к гравиметрическим площадкам на снегоходах и пешком.

Использовались цифровые гравиметры LaCoste & Romberg с разрешением в один микрогал. Эти инструменты каждые 2 секунды собирали гравиметрические данные, а затем усредняли, чтобы смягчить влияние высокочастотного шума, вызванного ветром и движением льда. Все показания гравитации были сняты в рамках циклов от и до гравитационной базы в лагере Дерксон. Абсолютное значение силы тяжести лагерной базы Дерксон (981560,936) было определено привязками к базе Канадской сети стандартов гравитации в Принс-Альберте (база № 9120-1957; значение: 981211,250).

Инструментарий позиционирования включал двухчастотный приемник Ashtech ProFlex 500 с двойным созвездием в качестве базы кинематики в реальном времени (RTK) и приемники модели Spectra Precision SP80 в качестве роверов. Приемники ProFlex и SP80 отслеживают позиционные спутники как в GPS (США), так и в Глонасс (Россия), что эффективно удваивает количество используемых спутников и обеспечивает высокую точность результатов в сложных условиях многолучевости.

Результаты гравитационного анализа (рис. 19) показывают, что в целом восточная сторона сетки съемки имеет больший гравитационный отклик, чем западная. По данным бурения, мощность чехла увеличивается с востока на запад. Измерения плотности, полученные из керна, а также интерполяции мощности перекрывающих пород использовались для моделирования результатов гравитации. Основной целью, полученной в результате моделирования, был круговой магнитный минимум, расположенный к северо-западу от скважины DER-03. Считается, что попытка учесть влияние самой мощной вскрышной породы в районе исследования (>80 метров) на отклик гравитационного минимума приводит к смоделированной глубинной аномалии гравитационного минимума.

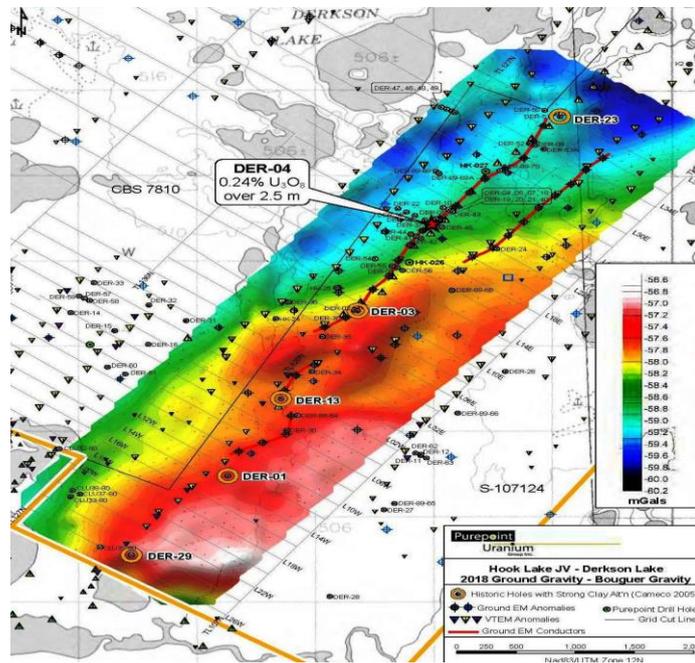


Рис. 19 Результаты гравитационного анализа.

Поскольку изменение толщины вскрышных пород в районе происходит постепенно с востока на запад, считается, что результаты гравитационного анализа предоставляют данные о плотности пород фундамента.

ИСТОЧНИКИ:

1. *Dean Besserer. «NI 43-101 Technical Report for the 939 Property, Northwest Territories, Canada. November 2021».*
2. *Emmanuel E. Okon, Ebenezer A. Kudamnya, Kehinde D. Oyeyemi, Benjamin O. Omang, Omotayo Ojo, Mohamed Metwaly. «Field Observations and Geophysical Research Applied to the Detection of Manganese (Mn) Deposits in the Eastern Part of Oban Massif, South-Eastern Nigeria: An Integrated Approach». Minerals 2022, 12(10)*
3. *Hydromet.2019.*
4. *International Battery Metals 07 2021.*
5. *Joana Cardoso-Fernandes, Ana C. Teodoro, Alexandre Lima, Mónica Perrotta and Encarnación Roda-Robles. «Detecting Lithium (Li) Mineralizations from Space: Current Research and Future Perspectives”. MDPI 2020,10.*
6. *Qi Chen, Zhifang Zhao, Jiayi Zhou, Min Zeng, Jisheng Xia, Tao Sun and Xin Zhao. «New Insights into the Pulang Porphyry Copper Deposit in Southwest China: Indication of Alteration Minerals Detected Using ASTER and WorldView-3 Data». Minerals 2021.*
7. *Technical Report on The Hook Lake Uranium Project Northern Saskatchewan, Canada (National Instrument 43-101) Prepared for Purepoint Uranium Group Inc by: Scott Frostad, B.Sc., M.A.Sc., P.Geo. 8, 2022.*
8. *www.sedar.com*