

ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
REMOTE SENSING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_3_86

MPHTI 89.57.25

**Е.Т. Бекишев¹, М.Е. Рахымбердина², М.А. Мизерная³, И.Е. Матайбаева⁴,
О.Н. Кузьмина⁵**НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан¹E-mail: ybekishev@edu.ektu.kz²E-mail: marzhanrakh@mail.ru³E-mail: mizernaya58@bk.ru⁴E-mail: mataybaeva@mail.ru⁵E-mail: kik_kuzmins@mail.ru**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПРИ ПОИСКЕ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВКО****ШҚО СИРЕК МЕТАЛЛ КЕН ОРЫНДАРЫН ІЗДЕУ КЕЗІНДЕ
ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ****REMOTE SENSING IN THE SEARCH FOR RARE METAL DEPOSITS
OF EAST KAZAKHSTAN REGION**

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения дистанционного зондирования и выполнен анализ технических параметров для выявления закономерностей локализации редкометалльного оруденения исследуемого района на основе выделения структурно-литологических особенностей посредством анализа мультиспектральных спутниковых данных в пределах потенциально перспективных магматогенно-рудных систем и выделения участков, перспективных для обнаружения редкометалльного оруденения. Проведен анализ спектральных характеристик редкометалльных пегматитов и минералов, составляющих их, а также методов обработки и интерпретации мультиспектральных снимков. В качестве методов обработки мультиспектральных изображений для проведения работ рассматриваются метод соотношения полос, RGB комбинация и метод главных компонент (PCA – principal component analysis).

Ключевые слова: дистанционное зондирование; редкие металлы; редкометалльные пегматиты; мультиспектральный снимок; соотношение полос; анализ главных компонент; спектральная характеристика.

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақаланың мақсаты қашықтықтан зондтау мүмкіндіктерін қарастыру және әлеуетті перспективті магматогендік-кенді жүйелер шегінде мультиспектрлі спутниктік деректерді талдау арқылы құрылымдық-литологиялық ерекшеліктерді бөлу негізінде зерттелетін ауданның сирек металды кенденуін оқшаулау заңдылықтарын анықтау үшін техникалық өлшем шарттарды талдау және сирек металды кенденуді анықтау үшін перспективті учаскелерді бөлу болып табылады. Сынақ полигоны ретінде Бакенное кен орны, Огневско-Бакенное кен алаңы (Огневка кеніші), Қалба жотасы, Ұлан ауданы, Шығыс Қазақстан облысы, Қазақстан таңдалды. Қашықтықтан зондтау деректері ретінде спектрлік суреттерді ұсынудың әртүрлі жүйелерінің техникалық сипаттамалары қарастырылады. Жұмыста сирек кездесетін металл пегматиттері мен оларды құрайтын минералдардың спектрлік сипаттамаларына талдау жасалды. Мультиспектралды суреттерді өңдеу және түсіндіру әдістері тақырыбы да көтеріледі. Мультиспектрлі суреттерді өңдеу әдістері ретінде таңдалған: жолақ қатынасы, RGB комбинациясы және негізгі компоненттерді талдау әдісі (PCA – principal component analysis).

Түйін сөздер: сирек металдар; сирек металды пегматиттер; қашықтықтан зондтау; мульти-спектральды сурет; жолақ қатынасы; негізгі компоненттерді талдау; спектрлік сипаттама.

Abstract. The purpose of this scientific article is to consider the possibilities of remote sensing and analysis of technical criteria for identifying patterns of localization of rare-metal mineralization of the studied area based on the identification of structural and lithological features through the analysis of multispectral satellite data within potentially promising magmatogenic ore systems and the identification of sites promising for the detection of rare-metal mineralization. The Bakennoye deposit, Ognevsko-Bakennoye ore field (Ognevka mine), Kalbinsky ridge, Ulansky district, East Kazakhstan region, Kazakhstan were selected as a test site. The technical characteristics of various spectral imaging systems are considered as remote sensing data. The paper analyzes the spectral characteristics of rare metal pegmatites and the minerals that make them up. The topic of methods of processing and interpretation of multispectral images is also raised. The following methods of processing multispectral images were chosen: the ratio of bands, RGB combination and the method of principal components (PCA – principal component analysis).

Keywords: Rare metals; rare metal pegmatites; remote sensing; multispectral image; band ratio; principal component analysis; spectral characteristic.

Введение. Редкие металлы, иногда именуемые как редкие элементы, – условное обозначение группы металлов (свыше 60 видов), в которую входят тантал, ниобий, литий, бериллий и др. Данные металлы играют важнейшую роль в современном производстве и имеют весомый вклад в развитие технологий. Высокий спрос на электронику и электромобили спровоцировал рост значимости и цен на редкие элементы, в особенности на литий. Если в 2011 г. основным рынком конечного использования лития было изготовление керамики и стекла (31 %), а аккумуляторы составляли лишь 23 % от общего потребления, то на сегодняшний день доля аккумуляторов в использовании лития составляет 80 %, а производство керамики и стекла – лишь 7 % [1]. Это показывает гигантский скачок потребления данного металла. По данным GlobalData (рис. 1), рынок потребления лития в 2024 г. увеличится в 2 раза, а использование литий-ионных батарей утроится [2].

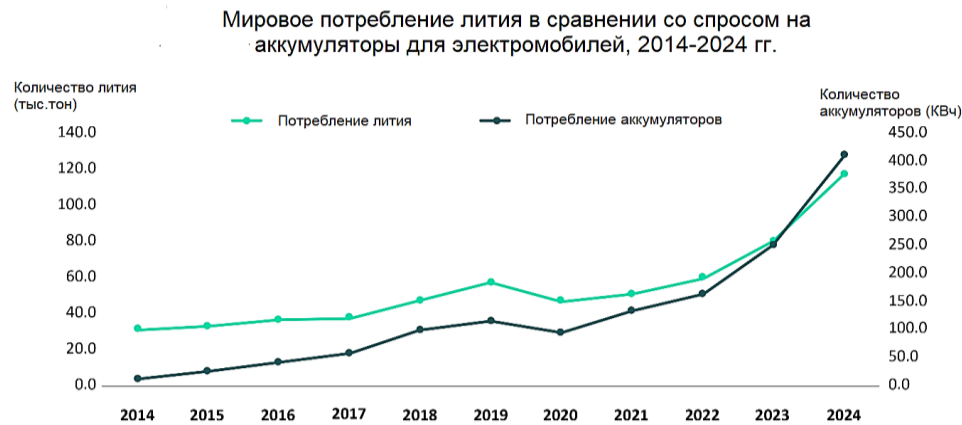


Рисунок 1. Мировое потребление лития в сравнении со спросом на аккумуляторы, 2014-2024 гг. [2]

Аналогичная тенденция наблюдается на рынке и других редких металлов, например тантала. Во время мирового кризиса 2008 г. был резкий спад на спрос тантала, но после этого наблюдается поэтапный рост (рис. 2) потребления тантала. Аналитики прогнозируют, что отметки дойдут до докризисных значений в ближайшее время [3].

После финансового кризиса 2008 г. наблюдается рост динамики потребления и бериллия. По данным Геологической службы США (USGS), годовой объем добычи бериллия (в пересчете на металл) составляет около 300 тонн, что в денежном эквиваленте составляет примерно 158 млн долларов, ежегодный объем потребления – 420 тонн.



Рисунок 2. Мировое потребление тантала в тоннах [3]

Учитывая динамику роста цен и потребления данных металлов в мире целесообразно продвигать геологические поиски, тем самым увеличивая минерально-сырьевую базу страны. Республика Казахстан имеет сравнительно большие запасы редкометалльного минерального сырья. Было выявлено и разведано 37 месторождений и около 500 рудных проявлений редких металлов и редких элементов. Однако на сегодняшний день новые месторождения не открываются, разведка редких металлов в стагнации. Например, после 70-х годов XX века не было открыто ни одного месторождения, связанного с редкометалльными пегматитами.

В связи с этим необходимо рассматривать и внедрять новые технологии в геологическом поиске и разведке редких металлов как дополнительный инструментарий. Под относительно новыми технологиями понимается дистанционное зондирование Земли. Дистанционное зондирование уже зарекомендовало себя как мощный ресурс для определения целевых зон разведки для нескольких типов месторождений. Во всем мире дистанционное зондирование используется при разведке полезных ископаемых с 70-х годов. Методы дистанционного зондирования широко и успешно используются в геологических целях, таких как картирование изменений, литологическое разграничение и разведка полезных ископаемых.

Литературный обзор. Разработка спутниковых систем дистанционного зондирования открыла геологам потенциально экономичную альтернативу традиционным методам. Дистанционное зондирование имеет богатый опыт использования в разведке различных месторождений, таких как: эпitherмальные месторождения золота [4], колчеданные месторождения [5], медно-порфировые месторождения [6], картирование гидротермально измененных пород [7].

Хотя дистанционное зондирование при поиске редкометалльных месторождений является давним предметом для научного исследования и даже для практического применения в мире, в Казахстане такие исследования изучены не в полной мере.

Редкие металлы (Ta, Nb, Li, Be, Sn и др.) в основном добываются из пегматитов. Редкометалльные пегматиты – крупнокристаллические породы, состоящие в основном из

кварца и полевого шпата и богатые минералами, содержащими летучие вещества (воду, фтор, бор, хлор). Они образованы в результате медленной кристаллизации гранитных расплавов в изолированных полостях. Применение дистанционного зондирования в поисках и картировании редкометалльных пегматитов отражены в исследованиях Perrotta и др. [8], которые использовали изображения ASTER для пробного картирования Li-содержащих пегматитов в регионе Вале-ду-Жекитиньонья, Бразилия, Morsli и др. [9] и нанесли на карту пегматиты с использованием спектрорадиометрии и данных ASTER (Зенага, Центральный Анти-Атлас, Марокко). Предложенная ими методология в исследованиях может быть применена для картирования пегматита в полусухих регионах с очень низким растительным покровом. В работе отмечается спектральное сходство некоторых классов пегматитов, которые сливаются с аллювием. В работе Cardoso-Fernandes и др. [10] определили литий содержащие пегматиты в алит-пегматитовом поле Фрегенеда-Альмендра с помощью снимков ASTER, Landsat-5, Landsat-8 и Sentinel-2 на основе таких технологии, как соотношение полос, цветная композиция и анализ главных компонент. Несмотря на распознавание пегматитов, методы показали спектральную путаницу с урбанизированными районами, а наличие растительного покрова маскирует спектральные признаки объекта. Наш исследуемый район не является урбанизированным, а проблему с растительным покровом предполагается решить с правильным выбором даты съемок, использованием снимков со спутников с высоким пространственным разрешением и с помощью анализа главных компонент, который может отсечь пиксели с растениями.

Материалы и методы исследования. Исследуемый район – месторождение Бакенное, расположенное в районе пос. Огневка Восточно-Казахстанской области. Месторождение расположено в северном эндо- и экзоконтакте Прииртышского гранитного массива Центральной Калбы, в пределах Огневско-Бакенного рудного узла.

В советские годы данное редкометалльное пегматитовое месторождение было нерентабельным и обрабатывалось с помощью государственной финансовой помощи. Позднее месторождение было закрыто. Однако в настоящее время, в связи с возросшей потребностью на мировом рынке редких металлов, недропользователи вновь проявляют большой интерес к изучению и обработке данного объекта.

Структура рудного поля здесь определяется системой пересекающихся северо-западных, субширотных и северо-восточных разломов в головной части предполагаемого Центрально-Калбинского надвига (или поддвига) на Иртышскую зону смятия. Активизация пологих трещинных систем в гранитах и сланцах в тектонически напряженной обстановке, очевидно, способствовала формированию редкометалльно-замещенных пегматитов [11].

Рудовмещающей средой явились апофизы контаминированных гранитов I фазы калбинского комплекса и метаморфизованные отложения такырской свиты: андалузитовые и кварц-полевошпат-слюдистые сланцы, мигматиты, артериты (рис. 3).

Основными породообразующими минералами являются альбит (60 %), кварц (18 %), микроклин (7 %) и мусковит (11 %); второстепенные – апатит, турмалин, жильбертит, флюорит, кальцит, онкозин.

Танталит-колумбит представлен гнездовой вкрапленностью и отдельными кристаллами таблитчатой и короткопризматической формы. В его составе Ta_2O_5 (67,8 %) существенно преобладает над Nb_2O_5 (16,9 %), отмечаются MnO (14,7 %), SnO_2 (0,9 %) и FeO (0,73 %). Касситерит черной окраски характеризуется повышенной концентрацией Ta_2O_5 (1,86 %) и Nb_2O_5 (1,41 %) при содержании SiO_2 – 81,6 %, окислов железа – 1,4 %, TiO_2 – 0,18 %, MnO – 0,13 %. Берилл представлен мелкой вкрапленностью и крупными кристаллами длиной до

1 м, относится к щелочной разновидности ($\text{BeO} = 8,9...11,68 \%$, $\text{Cs}_2\text{O} = 0,6...1,5 \%$). Главный минерал лития – сподумен концентрируется преимущественно в кварц-клевеландит-сподуменовом комплексе [11].

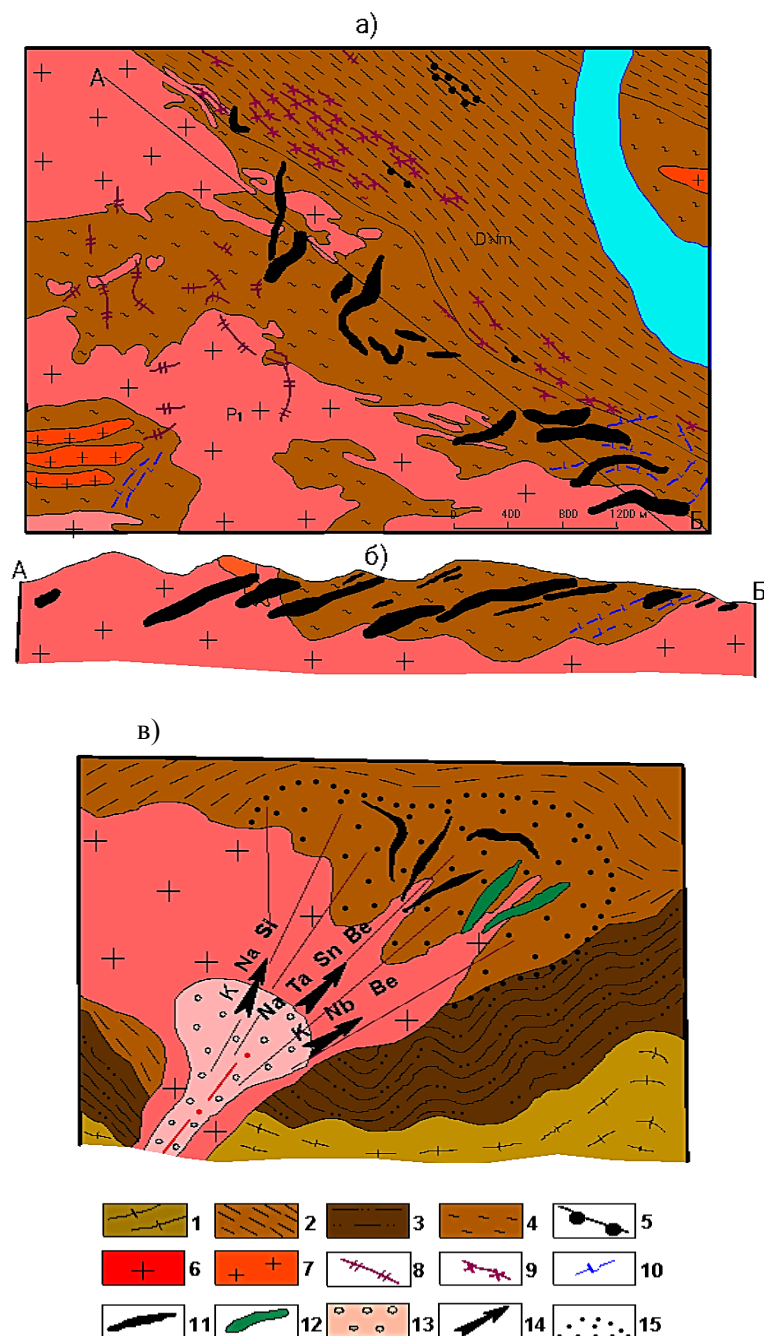


Рисунок 3. Схема геологического строения Бакенного месторождения (а – план месторождения; б – геологический разрез; в – модель образования) [11]: 1 – гранитно-метаморфический слой; 2 – углеродисто-песчаниково-алевролитовая, аспидная, такырская свита D3fm; 3 – нерасчлененные карбонатно-терригенные отложения кыстав-курчумской свиты, D2gv и более древних толщ (возможно каледонских); 4 – гранитизированные породы, мигматиты; 5 – дайки кунушского

комплекса, С3; 6 – граниты первой фазы, 7 – граниты второй фазы и 8 – жильные аплитовидные граниты калбинского комплекса; 9 – аплит-пегматиты; 10 – олигоклаз-микроклиновые; 11 – редкометалльные пегматиты; 12 – блоковые микроклиновые пегматиты; 13 – очаги рудоносных расплавов; 14 – направление перемещения флюидопотоков; 15 – эманационные ореолы РЭ

Выбор мультиспектральных данных. Выбор спутникового изображения является важным критерием для выделения и картографирования геологических объектов. Изучив методы получения космических данных на исследуемый район можно отметить несколько путей получения информации (табл. 1).

Таблица 1. Спутники дистанционного зондирования и их характеристики

Наименование спутников	Спектральный диапазон (нм)	Количество каналов	Пространственное разрешение (м)	Доступность
Landsat 7	450-2350	7	30	Бесплатно
Landsat 8	450-2350	9	30	Бесплатно
ASTER	520-2430	14	15	Платно
Sentinel-2	443-2190	13	10-20	Бесплатно
SPOT-5	490-1780	4	10-20	Платно
Worldview-2	400-1040	8	1,85	Платно
Worldview-3	400-2365	16	1,24-3,7	Платно
EO-1	357-2576	220	30	Бесплатно
IKONOS	450-850	4	3,2	Платно
KazEOSat-1	450-750	4	4	Платный
KazEOSat-2	440-850	5	6,5	Платный

Также необходимо учитывать доступность спутниковых данных. Например, спутники ASTER и Worldview-3 подходят под заданные параметры и критерии. Особенно давно в области спектральной геологии используются спутники ASTER, но эти космические снимки предоставляются платно. Из списка выделяется EO-1 со своими 220 каналами, так как данный спутник является гиперспектральным, но, к сожалению, архив данных не содержит снимков исследуемого района.

Космические снимки спутников Landsat и Sentinel-2 предоставляются бесплатно. Среди спутников Landsat был выбран Landsat 8, так как один из сенсоров Landsat 7 имеет технические проблемы и полосы с отсутствующими данными [13].

Для цифровой обработки и интерпретации изображений будут использованы мультиспектральные изображения Landsat-8 и Sentinel-2, поскольку их спектральные каналы более адекватны для геологических целей, чем продукты других миссий. Это связано с важными свойствами минералов – поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) и коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR), которые должны быть охвачены спектральными диапазонами конкретной полосы. В частности, необходимы изображения с

облачным покровом менее 10 %. Для получения лучших результатов рассматриваются только изображения с меньшим охватом растительностью. Наиболее оптимальным периодом для проведения исследования на участке Бакенное является конец апреля и начало мая, согласно метеорологическим данным и условиям съемок.

Landsat-8 – американский спутник дистанционного зондирования Земли, восьмой в рамках программы Landsat (седьмой выведенный на орбиту). Landsat-8 широко используется в геологических целях [14, 15]. Конечный продукт состоит из девяти спектральных полос с пространственным разрешением 30 м для полос 1-7 и 9 (пять полос в видимом диапазоне, NIR и две в SWIR) и 15 м для полосы 8 (панхроматической) и двух тепловых полос (10 и 11).

Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства. Мультиспектральный прибор Sentinel-2 (MSI) имеет 13 спектральных полос от VNIR (десять полос) до SWIR (три полосы): четыре полосы на 10 м, шесть полос на 20 м и три полосы с пространственным разрешением 60 м. Sentinel-2 так же, как и Landsat-8, широко используется для геологического картирования и имеет положительные результаты [16].

Спектральная характеристика минералов и горных пород. Возможность картирования различных минералов или групп минералов зависит от способности отображать спектр с диагностическими характеристиками поглощения. Из-за электронных переходов и колебаний ионов в структурах минералов существуют многочисленные полосы поглощения. Минералы бывают разных видов и структур, но спектральные особенности создают всего лишь несколько элементов: электронные переходы чаще всего создаются железом, в то время как колебательные часто создаются водой, гидроксильными ионами или карбонатами [17]. Поглощение в области 0,7...0,9 мкм сигнализирует о том, что в составе минерала есть железо, а в диапазоне SWIR наиболее важными колебательными переходами в минералах являются те, которые связаны с присутствием ОН-ионов или молекул воды. Характеристики поглощения при 1,9, 1,4, 1,14 и 0,94 мкм указывают на присутствие молекулярной воды в минералах. Коротковолновый инфракрасный диапазон длин волн не подходит для большинства безводных силикатов. Кварц показывает впадину на кривой излучения между 8 и 9 мкм в результате колебаний, растягивающих связь Si-O. Поэтому содержащие кварц породы (например, гранит) нужно искать в области теплового инфракрасного диапазона (TIR).

В месторождении Бакенное горные породы можно разделить на пегматиты, граниты и осадочные породы. Каждой области присущи свой минеральный состав и, соответственно, своя уникальная спектральная характеристика. Основные породообразующие минералы в редкометалльных пегматитах: альбит – 60 %, кварц – 18 %, микроклин – 7 % и мусковит – 11 %. Ценные минералы имеют следующий процентный состав: сподумен – 7,6 %, мусковит – 4,5 %, касситерит – 0,2 %, танталит-колумбит – 0,03 %. Так как ценные минералы составляют очень маленький объем в составе горной породы, не представляется возможность их напрямую идентифицировать. Авторы A.J.B. Thompson и др. [18] указывают на трудность идентификации минералов, присутствующих в количествах менее 5 %. Для точного определения они должны присутствовать в количестве 10 % или более. При наличии минералов с низким коэффициентом отражения для идентификации может потребоваться 20 % или более минерала в образце. Поэтому планируется работать со спектрами силикатов (альбит, кварц), так как они имеют большой процентный вес в породах и считается, что их спектры будут доминировать. Но сложность в том, что граниты и пегматиты имеют схожий состав в плане доминирующих минералов. Основу и гранитов, и пегматитов составляют кварц, полевые шпаты и слюды.

Для различия этих пород выдвигается метод определения их в разных спектральных диапазонах. Граниты следует идентифицировать с помощью использования тепловых инфракрасных диапазонов (TIR), так как они обладают высокой излучательной способностью в области от 10,30 до 11,70 мкм. J. Cardoso-Fernandes и др. в своих исследованиях предложили комбинации RGB, которые состоят из полосы SWIR в красном канале, видимой полосы в зеленом канале и тепловой полосы в синем канале: 5114 для ASTER, 7311 для Landsat-8. Данные комбинации создали ложно цветную композицию, в которой граниты окрасились светло-зеленые цвета.

Для определения пегматитов, в которых очень большой процент (60 %) альбита, планируется использовать VNIR и SWIR диапазоны. Спектральная кривая альбита, взятая из библиотеки спектров американской геологической службы, показывает области поглощения в SWIR диапазоне (рис. 4). Альбит обладает высокой отражательной способностью во всем диапазоне длин волн (0,4...2,5 мкм), но имеет две отображаемые полосы (около 1,4 и 1,9 мкм), которые обусловлены наличием воды в составе [19].

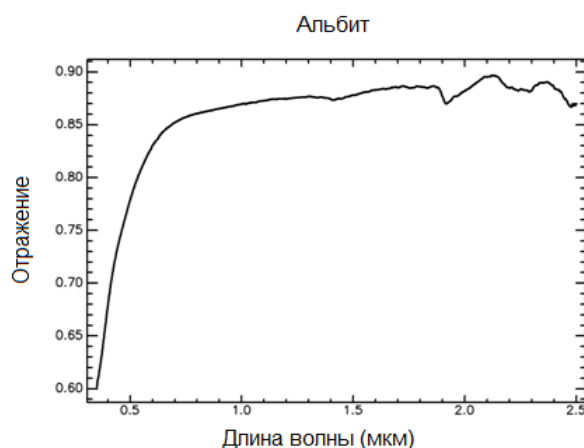


Рисунок 4. Спектральная кривая альбита [19]

В исследовании Morsli Y. и др., в котором с помощью спектрорадиометра определили спектральную сигнатуру пегматитов, в основном состоящих из кварца, мусковита и полевого шпата, была показана спектральная кривая, где визуально определяется те же самые зоны поглощения. Исследования показали, что пегматиты имеют полосы поглощения, связанные с водой (1,4 и 1,9 мкм), с гидроксильными ионами (2,2 мкм и 2,4 мкм) и с железом (0,9 мкм).

Методика обработки изображений. Перед тем как начать процесс классификации и интерпретации изображений, необходима предварительная обработка. Предварительная обработка улучшает дальнейшие возможности использования снимков за счет преобразования цифровых значений DN (Digital Numbers) в физические значения отражения на верхней границе атмосферы (TOA – Top Of Atmosphere). Кроме того, необходимо применить простую атмосферную коррекцию с помощью метода DOC 1 (Dark Object Subtraction 1 (вычитание темного объекта 1)).

Перед тем как начать процесс классификации, нужно преобразовать значения исходной яркости (DN) в значения коэффициента отражения (reflectance).

Коэффициент отражения определяется как соотношение между отраженной и падающей на поверхность энергией. При преобразовании используются данные, содержащиеся в файлах метаданных, загруженных вместе с изображениями. Преобразование DN - TOA

reflectance используется только для Landsat, так как снимки Sentinel-2 уже предоставлены в TOA reflectance.

Этап предварительной обработки выполняется с помощью плагина полуавтоматической классификации (SCP) для QGIS.

Также планируется использовать маскировку (masking) для удаления шумов и ненужных объектов – растений. С помощью вычисления нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), выявляется территория, покрытая растительностью и удаляется из сцены.

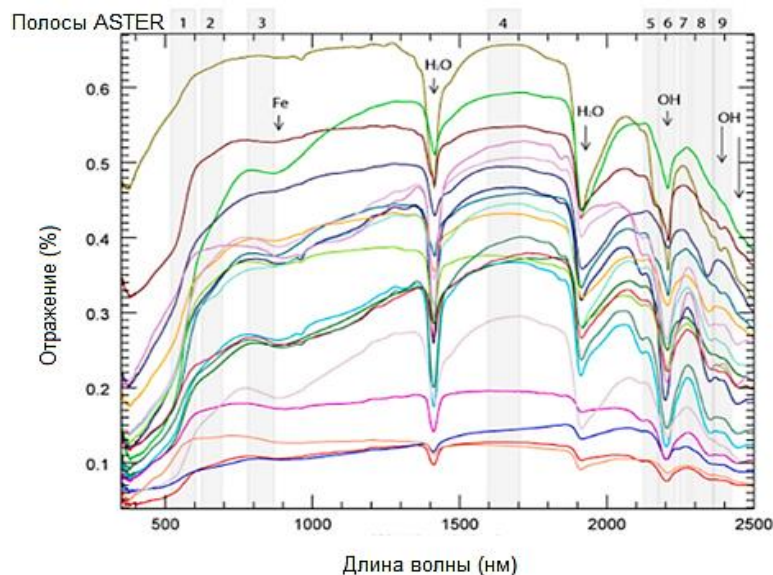


Рисунок 5. Спектральные характеристики образцов пегматита, полученные с помощью спектрорадиометра [9]

Результаты и их обсуждение. Анализ технических характеристик спутниковых данных на район исследования показывает, что данные Sentinel более высокоточные в плане пространственного разрешения. Приборы делают спектральные снимки с точностью 10...20 м, в то время как Landsat-8 предоставляют те же каналы с 30 м точностью. Недостатком Sentinel, точнее преимуществом Landsat-8, является то, что данный спутник имеет датчики тепловых полос. Тепловой инфракрасный диапазон (TIR) крайне необходим для картирования магматических пород, в частности гранитов [20].

Однако следует отметить, что пегматитовые жилы могут быть размером менее 10 м, что усложняет их идентификацию, и даже при использовании приемов для улучшения изображений можно «выжать» лишь пиксели с пространственным разрешением 10 м. Пиксели, которые охватывают различные неоднородные объекты, отображают объединенные сигнатуры и называются смешанными. Из этого следует, что для обнаружения выходов пегматитов малых размеров необходимы спектральные изображения от спутников с высоким пространственным разрешением. Для достижения этих целей необходимо рассмотреть возможности использования коммерческих спутников дистанционного зондирования, например Worldview-3.

Спектральная характеристика минералов и пород. Теоретически выявить конечную спектральную характеристику горной породы будет трудно, исходя только из эталонных

спектров отдельных минералов. Поэтому необходимо проведение спектрорадиометрических исследований. R.N. Clark в работе [21] утверждает, что смесь материалов можно разделить на 4 вида: 1) линейная смесь, в которой материалы в поле зрения оптически разделены и общий сигнал – это просто сумма дробной площади, умноженной на спектр каждого компонента; 2) плотная смесь, когда различные материалы находятся в тесном контакте на рассеивающей поверхности; 3) покрытия, которые образуются, когда один материал покрывает другой; 4) молекулярные смеси, которые возникают на молекулярном уровне, например, при смешивании двух жидкостей или жидкости и твердого вещества. Согласно этой классификации, горные породы относятся к плотным смесям и, в зависимости от оптических свойств каждого минерала, результирующий сигнал представляет собой сильно нелинейную комбинацию спектров конечных элементов.

На основании изученных работ проводимых в мире исследований можно сделать выводы, что результаты спектрорадиометрических анализов нельзя использовать как эталон. Это обусловлено тем, что состав и соотношение минералов в породе могут быть разными, в том числе и с включением нетипичных минералов. Например, авторы Gaoni др. в своих исследованиях [22] показывают отражение пегматита при 550...560 нм, в то же время, как образцы пегматитов в исследованиях Cardoso-Fernandes др. [23] отображают поглощение при 551 нм, связанное с включением Fe^{3+} и/или Mn^{3+} , а присутствие монтмориллонита и иллита отображается в пределах 1467 нм и 1912 нм. Таким образом, при использовании методов дистанционного зондирования в геологических целях необходимо учитывать и изучать локальную минералогию.

Методика обработки изображений. Из существующих методов обработки мультиспектральных изображений наиболее приемлемы цветовая комбинация (RGB), соотношение полос и анализ главных компонент.

Для обнаружения силикатов с помощью RGB комбинации авторы работы [24] Ali and Rouf рекомендуют использовать снимки Landsat 8 с полосами 10, 11 и 7, которые содержат две тепловые полосы и одну полосу завихрения. В этой комбинации силикатные минералы могут быть идентифицированы благодаря их характеристикам более высокой излучательной способности в области от 10,30 до 11,70 мкм. В работе J. Cardoso-Fernandes предлагаются комбинации RGB, способные дифференцировать Li-минерализацию: 327, 3211 и 7311. В случае Sentinel-2 комбинацию можно выполнять Visible, NIR и SWIR, поскольку у этого датчика нет полос в области TIR.

Предлагается использовать соотношение полос 6/7. Также в литературе рекомендуются соотношения 3/5 для Landsat 8 и 3/8 для Sentinel-2 для отражения литий-содержащих минералов. Однако данный метод не очень эффективен для прямого определения редкометальных пегматитов. Соотношения полос являются отличным приемом для выявления и картирования различий в составе между разными литологиями. Данный метод широко используется в дистанционном зондировании для определения гидротермальных изменений. Не все изменения связаны с оруденением, и не все рудные тела сопровождаются изменениями, но наличие измененных пород является ценным индикатором для определения месторождений.

Для анализа главных компонент будут использоваться подмножества из всех полос Landsat-8 и Sentinel-2. Предлагается на объекте проводить интерпретацию на основе спектральных характеристик горных пород и минералов в каждой полосе и, таким образом, будут отобраны нужные главные компоненты.

Заключение. Источниками спектральных снимков будут открытые архивные данные спутников дистанционного зондирования Landsat-8 и Sentinel-2. Данные спутники обеспечивают всю техническую и технологическую необходимость поставленных задач.

Несмотря на то, что пространственное разрешение 10...30 м, спектральный диапазон, количество каналов, доступность и обширная литература примеров использования являются главными преимуществами.

Для определения состава и оценки редкометальных пегматитов необходимо составить библиотеку спектральных характеристик на район исследования с использованием спектрорадиометра ASD FieldSpec и спектрометра Arcoptix FT-NIR Rocket. Данные приборы охватывают видимый ближний инфракрасный и коротковолновой инфракрасный диапазоны, что позволяет определить спектральную кривую пегматитов для дальнейшей интерпретации цветовых композитов спектральных снимков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета геологии Министерства индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан - BR 10264558.

Список литературы

1. Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity lithium/ usgs.gov. 03.04.2023. – URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>.
2. Global lithium demand to more than double by 2024, as electric vehicle battery production quadruples/ globaldata.com. 03.04.2023. – URL: <https://www.globaldata.com/media/mining/global-lithium-demand-double-2024-electric-vehicle-battery-production-quadruples/>.
3. M. Green. Kazera Global - Blue-Sky Potential of a World-Class Tantalum Mine Perfectly Positioned for the New “Green” Economic Revolution / alignresearch.co.uk. 03.04.2023. – URL: <https://www.alignresearch.co.uk/kazera-global/kazera-global-blue-sky-potential-of-a-world-class-tantalum-mine-perfectly-positioned-for-the-new-green-economic-revolution/>.
4. Bolouki S. M., Ramazi H.R., Maghsoudi A., Beiranvand Pour, A., &Sohrabi, G. (2020). A Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // Remote Sensing. – 12(1), Art. 1. – <https://doi.org/10.3390/rs12010105>.
5. Ali-Bik M.W., Hassan S.M., &Sadek M.F. (2020). Volcanogenic talc-copper deposits of Darhib-Abu Jurdi area, Egypt: Petrogenesis and remote sensing characterization // Geological Journal. – 55(7), 5330-5354. – <https://doi.org/10.1002/gj.3742>.
6. Beygi S., Talovina I.V., Tadayon M., & Pour, A. B. (2021). Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // International Journal of Image and Data Fusion. – 12(2), 155-175.
7. Frutuoso R., Lima A., & Teodoro A.C. (2021). Application of remote sensing data in gold exploration: Targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal // Arabian Journal of Geosciences. – 14, 1-18.
8. Perrotta M.M., Souza Filho C.R., &Leite C. A. S. (2005). Mapeamentoespectral de intrusõespegmatíticasrelacionadas a mineralizações de lítio, gemas e mineraisindustriaisna região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER // SimpósioBrasileiro De Sensoriamento Remoto. – 12(2005), 1855-1862.
9. Morsli Y., Zerhouni Y., Maimouni S., Alikouss S., Kadir H., & Baroudi Z. (2021). Pegmatite mapping using spectroradiometry and ASTER data (Zenaga, Central Anti-Atlas, Morocco) // Journal of African Earth Sciences. – 177, 104153.
10. Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A.C., & Lima, A. (2019). Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 76, 10-25.
11. Матайбаева И.Е. Закономерности формирования, условия размещения и прогностно-поисковые критерии оценки перспективместорождений редких металлов и редких земельВосточного Казахстана: дис. ... д-ра философии PhD: защищена 29.11.17: утв. 21.02.18/ Матайбаева Индира Едылевна. – А., 2018. – 147 с. – Библиогр.: с. 39-45.
12. Kurczyński Z., Abeldina R.K., Kurmanova G.K., Smunyova L.V., Moldumarova Z.E., & Yermekov, F.K. (2016). Possibilities of applying modern photogrammetry for the modernization of cadastral maps in Poland and Kazakhstan // ArchiwumFotogrametrii, KartografiiTeledetekcji. – 28, 53-64. – <https://doi.org/10.14681/afkit.2016.004>.
13. Комарова А.Ф., Журавлева И.В., Яблоков В.М. Открытые мультиспектральные данные и

- основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. – 2016. №1. – С. 40-74.
14. Khalifa A., Bashir B., Cakir Z., Kaya S., Al salman, A., &Henaish, A. (2021). Paradigm of Geological Mapping of the Adiyaman Fault Zone of Eastern Turkey Using Landsat 8 Remotely Sensed Data Coupled with PCA, ICA, and MNFA Techniques //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 10(6), 368. – <https://doi.org/10.3390/ijgi10060368>.
 15. Adiri Z., Harti A.E., Jellouli A., Maacha L., &Bachaoui, E. M. (2016). Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas // Journal of Applied Remote Sensing. – 10(1), 016005. – <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005>.
 16. Fal S., Maanan M., Baidder L., &Rhinane, H. (2019). The Contribution of Sentinel-2 Satellite Images for Geological Mapping in the South of Tafilalet Basin (Eastern Anti-Atlas, Morocco) // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W12, 75-82. – <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-75-2019>.
 17. Hunt G.R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // Geophysics. – 42(3), 501-513.
 18. Thompson A.J. B., Hauff P.L., & Robitaille A.J. (1999). Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy // SEG Discovery. – 39, 1-27. – <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1999-39.fea>.
 19. Hunt G.R. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals // Modern geology. – 1, 283-300.
 20. Rajesh H.M. (2004). Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping-An overview // Journal of mineralogical and Petrological Sciences. – 99(3), 83-103.
 21. Clark R.N., &Rencz A.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy // Manual of remote sensing. – 3(11), 3-58.
 22. Gao Y., Bagas L., Li K., Jin M., Liu Y., & Teng J. (2020). Newly Discovered Triassic Lithium Deposits in the Dahongliutan Area, NorthWest China: A Case Study for the Detection of Lithium-Bearing Pegmatite Deposits in Rugged Terrains Using Remote-Sensing Data and Images // Frontiers in Earth Science. – 8, 591966. – <https://doi.org/10.3389/feart.2020.591966>.
 23. Cardoso-Fernandes J., Silva J., Perrotta M. M., Lima A., Teodoro A. C., Ribeiro M. A., Dias F., Barrès O., Cauzid J., &Roda-Robles, E. (2021). Interpretation of the Reflectance Spectra of Lithium (Li) Minerals and Pegmatites: A Case Study for Mineralogical and Lithological Identification in the Fregeneda-Almendra Area // Remote Sensing. – 13(18), 3688. – <https://doi.org/10.3390/rs13183688>.
 24. Ali A. S., & Pour, A.B. (2014). Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: A case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan // International Journal of Basic and Applied Sciences. – 3(3), 199.

References

1. Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity lithium/ usgs.gov. 03.04.2023. – URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>.
2. Global lithium demand to more than double by 2024, as electric vehicle battery production quadruples/ globaldata.com. 03.04.2023. – URL: <https://www.globaldata.com/media/mining/global-lithium-demand-double-2024-electric-vehicle-battery-production-quadruples/>.
3. M. Green. Kazera Global - Blue-Sky Potential of a World-Class Tantalum Mine Perfectly Positioned for the New “Green” Economic Revolution / alignresearch.co.uk. 03.04.2023. – URL: <https://www.alignresearch.co.uk/kazera-global/kazera-global-blue-sky-potential-of-a-world-class-tantalum-mine-perfectly-positioned-for-the-new-green-economic-revolution/>.
4. Bolouki S. M., Ramazi H.R., Maghsoudi A., Beiranvand Pour A., &Sohrabi G. (2020). A Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // Remote Sensing. – 12(1), Art. 1. – <https://doi.org/10.3390/rs12010105>.
5. Ali-Bik, M. W., Hassan, S. M., &Sadek, M. F. (2020). Volcanogenic talc-copper deposits of Darhib-Abu Jurdi area, Egypt: Petrogenesis and remote sensing characterization // Geological Journal. – 55(7), 5330–5354. – <https://doi.org/10.1002/gj.3742>.
6. Beygi S., Talovina I.V., Tadayon M., & Pour A.B. (2021). Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // International Journal of Image and Data Fusion. – 12(2), 155-175.
7. Frutuoso R., Lima A., & Teodoro, A.C. (2021). Application of remote sensing data in gold exploration:

Targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal // *Arabian Journal of Geosciences*. – 14, 1-18.

8. Perrotta M.M., Souza Filho C.R., & Leite C.A. S. (2005). Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER // *Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto*. – 12(2005), 1855-1862.
9. Morsli Y., Zerhouni Y., Maimouni S., Alikouss S., Kadir H., & Baroudi Z. (2021). Pegmatite mapping using spectroradiometry and ASTER data (Zenaga, Central Anti-Atlas, Morocco) // *Journal of African Earth Sciences*. – 177, 104153.
10. Cardoso-Fernandes J., Teodoro A.C., & Lima A. (2019). Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 76, 10-25.
11. Matajbaeva I.E. Zakonomernosti formirovaniya, usloviya razmeshcheniya i prognoznno-poiskovye kriterii ocenki perspektiv mestorozhdenij redkih metallov i redkih zemel' Vostochnogo Kazakhstana. [Tekst]: dis. ... d-ra filosofii PhD: zashchishchena 29.11.17: utv. 21.02.18 / Matajbaeva Indira Edylevna. – A, 2018. – 147 s. – Bibliogr.: s. 39-45.
12. Kurczyński Z., Abeldina R.K., Kurmanova G.K., Smunyova L.V., Moldumarova, Z.E., & Yermekov, F. K. (2016). Possibilities of applying modern photogrammetry for the modernization of cadastral maps in Poland and Kazakhstan // *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. – 28, 53-64. – <https://doi.org/10.14681/afkit.2016.004>.
13. Komarova, A.F.; Zhuravleva, I.V.; Yablokov, V.M. Otkrytie mul'tispektral'nye dannye i osnovnye metody distancionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova // *Principy ekologii*. – 2016. – №1. – S. 40–74.
14. Khalifa A., Bashir B., Cakir Z., Kaya S., Al salman A., & Henaish A. (2021). Paradigm of Geological Mapping of the Adiyaman Fault Zone of Eastern Turkey Using Landsat 8 Remotely Sensed Data Coupled with PCA, ICA, and MNFA Techniques // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 10(6), 368. – <https://doi.org/10.3390/ijgi10060368>.
15. Adiri Z., Harti A. E., Jellouli A., Maacha, L., & Bachaoui E.M. (2016). Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 10(1), 016005. – <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005>.
16. Fal S., Maanan M., Baidder L., & Rhinane, H. (2019). The Contribution of Sentinel-2 Satellite Images for Geological Mapping in the South of Tafilalet Basin (Eastern Anti-Atlas, Morocco) // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W12*, 75-82. – <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-75-2019>.
17. Hunt G.R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // *Geophysics*. – 42(3), 501-513.
18. Thompson A.J.B., Hauff P.L., & Robitaille A.J. (1999). Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy // *SEG Discovery*. – 39, 1-27. – <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1999-39.fea>.
19. Hunt G.R. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals // *Modern geology*. – 1, 283-300.
20. Rajesh H.M. (2004). Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping-An overview // *Journal of mineralogical and Petrological Sciences*. – 99(3), 83-103.
21. Clark R.N., & Rencz A.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy // *Manual of remote sensing*. – 3(11), 3-58.
22. Gao Y., Bagas L., Li K., Jin M., Liu Y., & Teng, J. (2020). Newly Discovered Triassic Lithium Deposits in the Dahongliutan Area, North West China: A Case Study for the Detection of Lithium-Bearing Pegmatite Deposits in Rugged Terrains Using Remote-Sensing Data and Images // *Frontiers in Earth Science*. – 8, 591966. – <https://doi.org/10.3389/feart.2020.591966>.
23. Cardoso-Fernandes J., Silva J., Perrotta M. M., Lima A., Teodoro A.C., Ribeiro M.A., Dias F., Barrès O., Cauzid J., & Roda-Robles, E. (2021). Interpretation of the Reflectance Spectra of Lithium (Li) Minerals and Pegmatites: A Case Study for Mineralogical and Lithological Identification in the Fregeneda-Almendra Area. *Remote Sensing*, 13(18), 3688. <https://doi.org/10.3390/rs13183688>.
24. Ali A.S., & Pour A.B. (2014). Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: A case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan // *International Journal of Basic and Applied Sciences*. – 3(3), 199.