

УДК 550.8.053

Буланчиев Ж.М.

*Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан*

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ (ДЗЗ) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ:
МИРОВОЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ КЫРГЫЗСТАНА
(ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)**

Аннотация. В обзорной работе рассмотрены современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), применяемые для выявления зон минерализации, структурных нарушений и геологических аномалий на территории Кыргызстана. Особое внимание уделено возможностям мульти- и гиперспектральных спутниковых систем (ASTER, Sentinel-2, Landsat 8/9, PRISMA, Hyperion) в диапазонах VNIR–SWIR–TIR при решении задач минералогического картирования и структурно-геологических исследований.

Проанализированы основные методы спектральной обработки данных, включая расчёт диагностических индексов, анализ глубины спектральных поглощений, классификацию отражательных характеристик и интеграцию спутниковых данных с геологическими картами и цифровыми моделями рельефа. Обобщены результаты исследований в пределах Центрального Тянь-Шаня, Алая и южных регионов Кыргызстана, а также представлен сравнительный анализ опыта стран Центральной Азии.

Материалы статьи систематизируют современный уровень применения спутниковых технологий в геологоразведке региона и определяют перспективные направления оптимизации методов ДЗЗ в минералого-геологических исследованиях Кыргызской Республики.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Кыргызстан, ASTER, Sentinel-2, SWIR, минералогическое картирование, Тянь-Шань, геологоразведка, гиперспектральные данные.

**ПАЙДАЛУУ КЕНДЕРДИ ИЗИЛДӨӨ ЖАНА ЧАЛГЫНДООДО ЖЕРДИ
АЛЫСТАН ЗОНДОО (ЖАЗ) ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН КОЛДОНУУ:
ДУЙНӨЛҮК ТАЖРЫЙБА ЖАНА КЫРГЫЗСТАН ҮЧҮН КЕЛЕЧЕГИ
(АДАБИЯТТЫК ОБЗОР)**

Кыскача мазмуну. Бул обзордук макалада Кыргызстандын аймагында минералдашуу зоналарын, структуралык бузулууларды жана геологиялык аномалияларды аныктоодо колдонулуучу Жерди алыстан зонддоо (ЖАЗ) ыкмалары каралат. Минералогиялык картографиялоо жана структуралык-геологиялык изилдөөлөр үчүн VNIR–SWIR–TIR спектралдык диапазондорунда иштеген мульти- жана гиперспектралдык спутниктик системалардын (ASTER, Sentinel-2, Landsat 8/9, PRISMA, Hyperion) мүмкүнчүлүктөрүнө өзгөчө көңүл бурулат.

Спектралдык маалыматтарды иштетүүнүн негизги ыкмалары, анын ичинде диагностикалык индекстерди эсептөө, спектралдык сиңирүү терендигин талдоо, чагылуу мүнөздөмөлөрүн классификациялоо жана ЖАЗ маалыматтарын геологиялык карталар жана рельефтин санариптик моделдери менен интеграциялоо талданган. Борбордук Теңир-Тоодо, Алай аймагында жана Кыргызстандын түштүк региондорунда жүргүзүлгөн изилдөөлөрдүн жыйынтыктары жалпыланып, Борбор Азия өлкөлөрүнүн тажрыйбасы менен салыштырмалуу талдоо берилген.

Макалa региондогу геологиялык чалгындоодо спутниктик технологияларды колдонуунун азыркы деңгээлин системалаштырып, Кыргыз Республикасында минералогиялык-геологиялык изилдөөлөрдө ЖАЗ ыкмаларын өркүндөтүүнүн перспективдүү багыттарын аныктайт.

Негизги сөздөр: жерди алыстан зонддоо, Кыргызстан, ASTER, Sentinel-2, SWIR, минералогиялык картографиялоо, Теңир-Тоо, геологиялык чалгындоо, гиперспектралдык маалыматтар.

APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR THE STUDY AND EXPLORATION OF MINERAL RESOURCES: GLOBAL EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR KYRGYZSTAN (LITERATURE REVIEW)

Abstract. This review paper examines modern remote sensing approaches applied to the identification of mineralization zones, structural disturbances, and geological anomalies within the territory of Kyrgyzstan. Particular attention is given to the capabilities of multispectral and hyperspectral satellite systems (ASTER, Sentinel-2, Landsat 8/9, PRISMA, Hyperion) operating in the VNIR–SWIR–TIR spectral ranges for mineralogical mapping and structural–geological investigations.

Key spectral data processing techniques are analyzed, including the calculation of diagnostic indices, absorption feature depth analysis, reflectance-based classification, and the integration of remote sensing data with geological maps and digital elevation models. The results of studies conducted in the Central Tien Shan, Alay region, and southern Kyrgyzstan are summarized, along with a comparative analysis of experience from other Central Asian countries.

The presented materials systematize the current level of satellite technology application in regional mineral exploration and outline перспективные directions for optimizing remote sensing methods in mineralogical and geological studies of the Kyrgyz Republic.

Keywords: remote sensing, Kyrgyzstan, ASTER, Sentinel-2, SWIR, mineral mapping, Tien Shan, geological exploration, hyperspectral data.

ВВЕДЕНИЕ

Горные территории Кыргызской Республики относятся к числу геологически сложных и ресурсно перспективных регионов Центральной Азии. Для них характерны высокая тектоническая активность, широкое развитие магматических и метаморфических комплексов и разнообразие проявлений полиметаллических, редкоземельных, золоторудных, сурьмяных и ртутных месторождений. Значительная расчленённость рельефа, труднодоступность и экстремальные климатические условия существенно осложняют проведение традиционных геологоразведочных работ и повышают их стоимость [1].

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются эффективным инструментом предварительных этапов минералогического картирования и структурно-геологических исследований. Современные мульти- и гиперспектральные системы обеспечивают диагностику минералов и признаков рудных систем в диапазонах VNIR, SWIR и TIR, что расширяет возможности интерпретации литологических и гидротермальных изменений.

Международный опыт подтверждает высокую эффективность спутников ASTER, Landsat 8/9, Sentinel-2, Hyperion и PRISMA при минералогическом и литологическом картировании [5–8]. Применение спектральных индексов, анализа главных компонент и тепловых коэффициентов позволяет выявлять рудные структуры даже в сложных геодинамических условиях [9].

В Кыргызстане активное внедрение ДЗЗ началось с 2000-х годов. Исследования отечественных авторов демонстрируют значительный потенциал спутниковых данных при изучении районов Ак-Тюз, Кумтор, Чаткал, Южный Тянь-Шань и Алай [1, 10–13]. Вместе с тем сохраняются ограничения, связанные с отсутствием современных данных SWIR/TIR ASTER, сезонной изменчивостью спектральных характеристик и сложностью интерпретации в условиях активной тектоники.

Цель обзора — систематизация современных методов ДЗЗ для оценки полезных ископаемых в Кыргызстане и определение перспектив развития спектрально-диагностических подходов в минералогическом картировании.

ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ДЗЗ

Методы дистанционного зондирования Земли являются важным инструментом геологоразведочных и минералогических исследований, обеспечивая получение мультиспектральной, гиперспектральной и тепловой информации о поверхности. Они эффективны при выявлении зон гидротермальной альтерации, литологических контактов и структурных нарушений. В разделе рассмотрены основные спутниковые системы и используемые подходы спектрального анализа.

Международные спутниковые системы

Система **ASTER** остаётся одним из ключевых инструментов минералогического картирования благодаря каналам в диапазонах VNIR, SWIR, и TIR (рисунок 1). Диагностические полосы поглощения в области 2.2–2.4 мкм позволяют идентифицировать каолинит, серицит, хлорит, эпидот и карбонаты. После 2008 г. модуль SWIR функционирует ограниченно, поэтому используются архивные данные или их комбинация с Sentinel-2 и Landsat [6, 9].

- **VNIR (Visible and Near Infrared)** — видимый и ближний инфракрасный диапазон (0.4 – 1.0 мкм) — чувствителен к оксидам железа, минералам выветривания и растительному покрову [2];
- **SWIR (Short-Wave Infrared)** — коротковолновый инфракрасный диапазон (1.0 – 2.5 мкм) — наиболее информативен для диагностики минералов гидротермального изменения: каолинита, альунита, серицита, хлоритов и карбонатов [2, 3];
- **TIR (Thermal Infrared)** — тепловой инфракрасный диапазон (8–12 мкм) — позволяет различать литологические комплексы по тепловому излучению, особенно кварцевые и карбонатные породы [4].

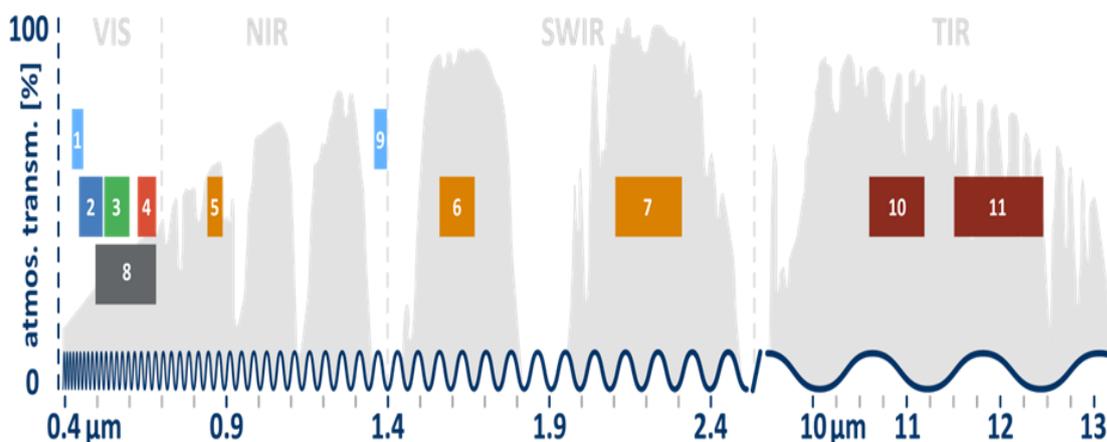


Рисунок 1. Атмосферная прозрачность и спектральные диапазоны VIS–NIR–SWIR–TIR, используемые в дистанционном зондировании Земли.

Программа **Landsat 7/8/9** предоставляет долговременный архив наблюдений. Каналы SWIR (1.6 и 2.2 мкм) чувствительны к ОН-группам, глинистым минералам и оксидам железа, что делает данные востребованными для ретроспективного анализа зон гидротермальных изменений.

Sentinel-2 (13 каналов, 10–20 м) применяется для расчёта минералогических индексов (AlOH, FeOH, CO₃). Каналы B11 и B12 информативны при картировании глинистых минералов. (рисунок 2)

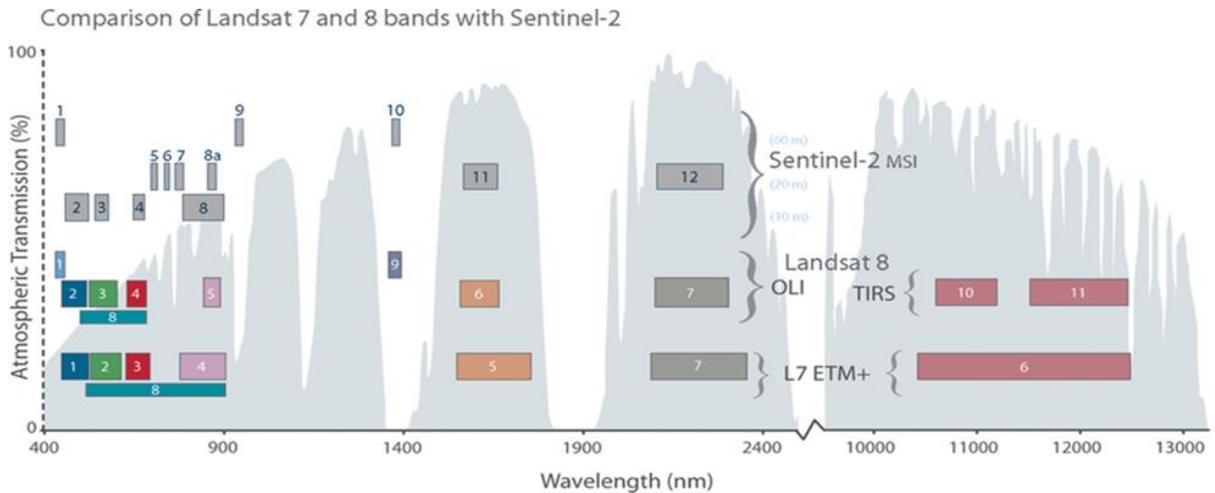


Рисунок 2. Сопоставление спектральных диапазонов сенсоров Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS и Sentinel-2 MSI в диапазоне 0.4 – 13 мкм.

WorldView-3 сочетает PAN, VNIR и 8 узких SWIR-каналов (2.1–2.4 мкм, 3.7 м), что обеспечивает детальное картирование малых рудопроявлений и зон окварцевания. Гиперспектральные сенсоры **Hyperion** (242 канала, ~30 м) и **AVIRIS** (224 канала, авиационный) позволяют реконструировать непрерывные спектры отражения и выполнять детальную диагностику глинистых, карбонатных и редкоземельных минералов (рисунок 3). Таким образом, мультиспектральные системы эффективны для регионального анализа, тогда как гиперспектральные данные применяются для детальной минералогической интерпретации.

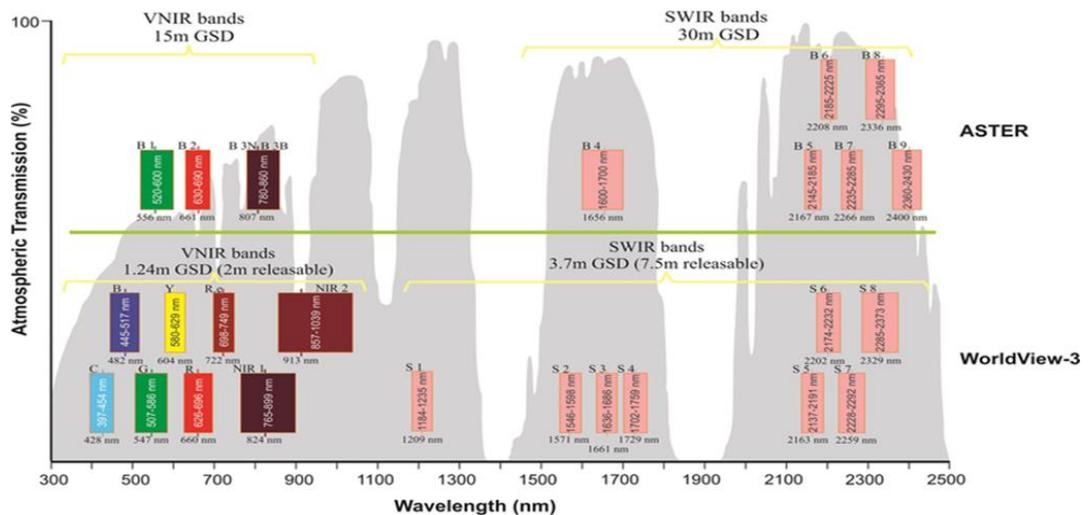


Рисунок 3. Сравнение спектральных диапазонов спутников ASTER и WorldView-3 в диапазоне 0.3–2.5 мкм. Показаны окна атмосферной прозрачности и пространственное разрешение каналов

Региональные источники данных Центральной Азии

В странах Центральной Азии ASTER, Landsat и Sentinel применяются для анализа тектонических структур и зон альтерации в пределах Тянь-Шаня и Памира. SWIR-диапазон используется для диагностики глинистых минералов, эпидота, серицита и железистых окислов [9].

Источники данных в Кыргызской Республике

В Кыргызстане используются:

- архивные данные ASTER и Landsat;
- материалы Sentinel-2;
- геологические карты масштабов 1:200 000 и 1:500 000;
- локальные спектральные библиотеки;
- результаты полевых экспедиций (Ак-Тюз, Кумтор, Джеруй, Чаткал и др.).

Работы отечественных исследователей подтверждают эффективность ДЗЗ при изучении золоторудных, редкоземельных и полиметаллических систем [9–15].

Геолого-геофизический контекст Кыргызской Республики

Территория Кыргызстана характеризуется активной тектоникой, развитой системой разломов и широким распространением гидротермальной альтерации, что формирует выраженные спектральные аномалии в диапазонах VNIR–SWIR–TIR.

Спутниковые данные ASTER, Landsat 8/9 и Sentinel-2 позволяют выделять зоны аргиллитизации, серицитизации, пропицитизации и окварцевания в районах Ак-Тюз, Кумтор, Джеруй, Кызыл-Жар, Орловка и Сары-Джаз [12–15].

Сочетание тектонической расчленённости и минералогической контрастности делает горные районы Кыргызской Республики перспективными для применения мульти- и гиперспектральных методов, особенно в труднодоступных зонах.

Таблица 1 - Характеристики основных спутниковых систем ДЗЗ.

| Спутник | Спектральные диапазоны | Пространственное разрешение | Наиболее эффективное применение |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| ASTER | VNIR, SWIR, TIR | 15 м; 30 м; 90 м | Альтерация, карбонаты, глины, минералы Fe |
| Landsat 7/8/9 | VNIR, SWIR, TIR | 15–30–100 м | Гидротерм., зоны окислов железа |
| Sentinel-2 | VIS, NIR, SWIR (13 каналов) | 10–20 м | Минералогич. индексы, картирование |
| WorldView-3 | VIS–SWIR (8 каналов SWIR) | 1.2–3.7 м | Детальная минералогия, литология |
| Hyperion | 242 гиперспектр. каналов | 30 м | Глины, карбонаты, редкоземельные минералы |

МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Спектральный анализ является основой дистанционного минералогического картирования и основан на интерпретации отражательной способности пород в диапазонах VNIR–SWIR–TIR. Диагностика минералов осуществляется по характерным

полосам поглощения, обусловленным присутствием ОН-групп, карбонатных комплексов и железосодержащих фаз [17, 18]. Наиболее информативным для задач альтерационного картирования является диапазон SWIR (2.0–2.4 мкм) [3].

Алгоритмы спектральной обработки

Наиболее распространённые методы включают:

SAM (Spectral Angle Mapper) — сравнение спектра пикселя с эталоном на основе угловой меры сходства; устойчив к изменению освещённости и широко применяется для мульти- и гиперспектральных данных.

Метод сравнивает спектр пикселя с эталонным спектром

Преимущества метода:

- устойчив к изменению освещения;
- работает для многоспектральных и гиперспектральных данных;
- широко используется в данных ASTER, Hyperion и AVIRIS [8].

Пример: в 2005 году применили SAM для картирования зон серицитизации на офиолитах Омана [4].

SID (Spectral Information Divergence) — вероятностный подход, оценивающий расхождение спектральных распределений; эффективен при анализе гиперспектральных данных.

Метод оценивает различие между спектрами через меру статистической дивергенции.

Особенности SID:

- чувствителен к слабым изменениям спектров;
- наиболее эффективен для гиперспектральных данных при сложных минералогических условиях [15].

PCA (Principal Component Analysis) — метод снижения размерности, позволяющий выделять аномалии и усиливать контраст минерализованных зон.

Метод позволяет:

- уменьшать шумы;
- выявлять слабые аномалии;
- повышать визуальную контрастность зон железа и глинистых минералов.

Применение: PCA использовали для анализа гидротермальных зон Памира в исследованиях 2018 г. [16].

MNF (Minimum Noise Fraction) — преобразование, направленное на отделение информативной составляющей сигнала от шума.

Используется преимущественно в гиперспектральной съёмке (Hyperion, AVIRIS). Классический пример — применение MNF для анализа AVIRIS [19].

PPI (Pixel Purity Index) — метод выделения спектрально «чистых» пикселей (эндмемберов) для последующей классификации.

Используется совместно с MNF и n-D визуализацией для:

- выделения минералов;
- построения библиотек эндмемберов;
- улучшения классификации SAM/SID.

Комбинация указанных алгоритмов повышает достоверность минералогической интерпретации в условиях сложной тектоники.

Спектральные индексы

Спектральные индексы представляют собой отношения или разности каналов, усиливающие диагностические признаки минералов и подавляющие влияние освещённости и рельефа. Основные индексы приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные спектральные индексы для анализа минералов.

| Индекс | Диапазон / Формула | Чувствительность | Геологическая интерпретация |
|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| Ferric Iron Index | Red / NIR | Fe ³⁺ (гематит, лимонит, гоэтит) | Зоны окисления |
| Ferrous Iron Index | NIR / SWIR | Fe ²⁺ (биотит, амфибол, пироксен) | Мафит-ультрамафитовые комплексы |
| Mg-OH Index | 2.30–2.33 мкм | Хлорит, тальк | Пропилитизация |
| Fe-OH Index | 2.25 мкм | Эпидот, гиббсит | Серицит-эпидотовые зоны |
| Clay Minerals Index | 2.16–2.22 мкм | Каолинит, серицит | Аргиллитизация |
| Carbonate Index | 2.30–2.35 мкм | Кальцит, доломит | Карбонатизация |
| Water Absorption Index | 0.94 мкм | Гидратация | Водонасыщенность |
| Quartz Index | SWIR/TIR | Кварц | Силикатизация |
| REE Curvature Index | 2.20–2.45 мкм (кривизна) | Монацит, бастнезит | REE-минерализация |

Спектральные библиотеки

Для повышения точности классификации используются международные библиотеки (USGS, NASA JPL и др.), а также локальные эталоны, сформированные в Институте геологии НАН КР. Применение региональных спектров (Ак-Тюз, Кумтор, Орловка, Сары-Джаз) существенно повышает достоверность распознавания минералов.

Применение в Кыргызстане

В Кыргызстане методы SAM, PCA, MNF и спектральные индексы применяются для анализа зон пропилитизации, серицитизации, аргиллитизации и редкоземельной минерализации в районах Ак-Тюз, Кумтор, Орловка, Чаткал и Тескей-Ала-Тоо [12–15]. Комбинация данных ASTER и Landsat SWIR доказала эффективность при картировании гидротермальных изменений.

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Предварительная обработка данных является обязательным этапом перед выполнением спектрального анализа. Корректность радиометрической, атмосферной и геометрической коррекции определяет точность расчёта спектральных индексов и достоверность минералогической интерпретации [2, 6, 8, 20].

Радиометрическая и атмосферная коррекция

Первоначально цифровые значения пикселей (DN) преобразуются в физические параметры — радианс и отражательную способность поверхности (surface reflectance). Радиометрическая коррекция включает калибровку сенсора, нормализацию по солнечной освещённости и устранение системных шумов. Для данных ASTER дополнительно применяется коррекция перекрёстных помех в SWIR-каналах.

Атмосферная коррекция направлена на устранение влияния водяного пара, аэрозолей и молекулярного рассеяния, особенно выраженного в диапазонах 1.4 и 1.9 мкм. В практике используются алгоритмы FLAASH, QUAC, Sen2Cor, LEDAPS и LaSRC (таблица 3). Результатом является изображение в единицах surface reflectance, пригодное для количественного анализа.

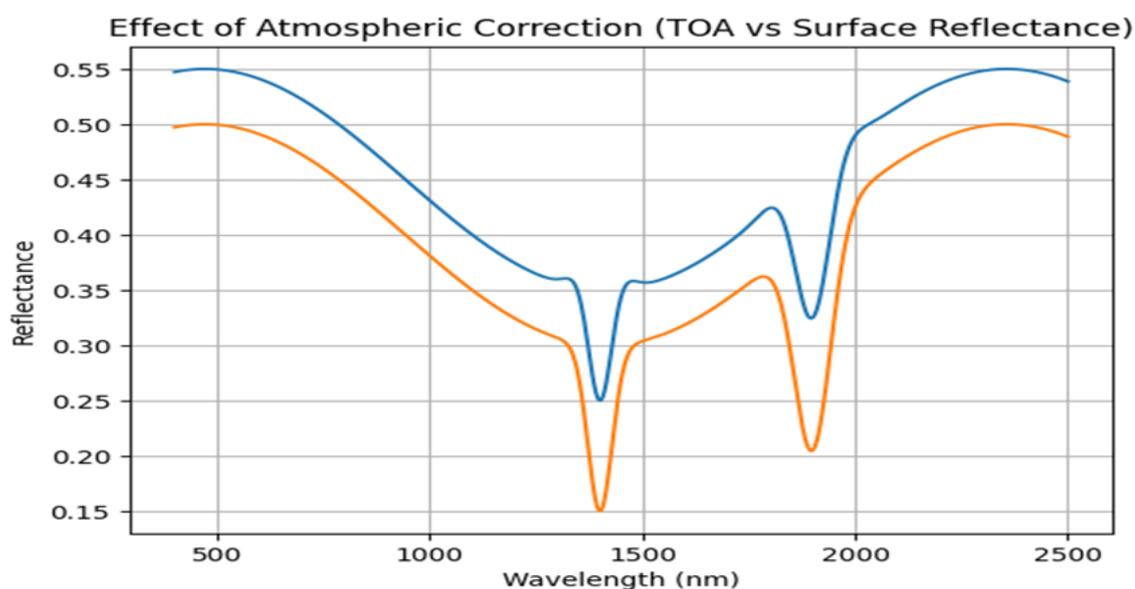


Рисунок 4. Влияние атмосферной коррекции на форму спектральной кривой отражения (TOA и Surface Reflectance).

Таблица 3 - Основные методы радиометрической и атмосферной обработки.

| Метод | Описание | Сенсоры | Особенности |
|-------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
| FLAASH | Атмосферная коррекция гипер/мульти спектров | ASTER, Hyperion, AVIRIS | Высокая точность |
| QUAC | Быстрая коррекция без параметров атмосферы | ASTER, Landsat, Hyperion | Очень быстрый метод |
| Sen2Cor | Атмосферная коррекция Sentinel-2 | Sentinel-2 A/B | Официальный алгоритм ESA |
| LEDAPS/LaSR C | Коррекция Landsat (Surface Reflectance) | Landsat 8/9 | Стандарт USGS |
| Radiometric Calibration | Преобразование DN в радианс | Все сенсоры | Базовый шаг обработки |

Геометрическая и топографическая коррекция

Геометрическая обработка устраняет искажения, вызванные орбитальной геометрией и рельефом. Выполняется ортокоррекция с использованием цифровых моделей рельефа (SRTM, ASTER GDEM), геопривязка и контроль точности.

В горных условиях Кыргызстана обязательна топографическая коррекция, уменьшающая влияние различной освещённости склонов. Наиболее распространены методы C-correction и Minnaert correction. Их применение позволяет повысить сопоставимость спектральных характеристик в пределах сложного рельефа.

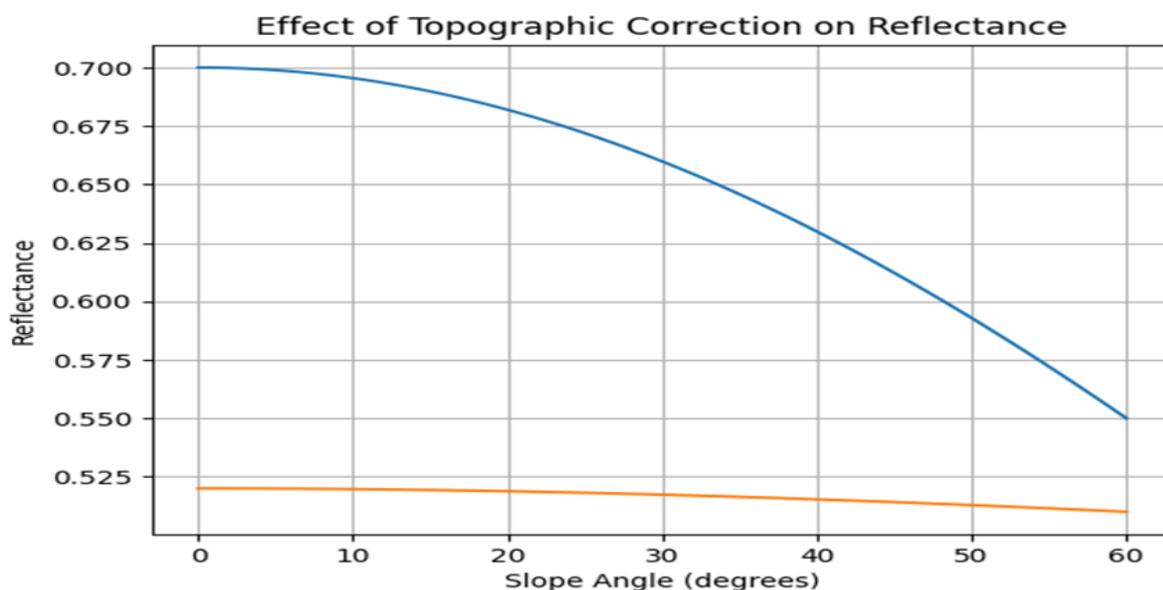


Рисунок 5. Влияние топографической коррекции на отражательную способность склонов различной крутизны.

Маскирование сцены

Для повышения достоверности анализа исключаются облака, тени, снежный покров, водные поверхности и насыщенные пиксели. Используются QA-слои Landsat и Sentinel-2, алгоритм FMask, а также пороговые фильтры по NDVI и яркости. В высокогорных районах особое значение имеет выделение скальных выходов и участков с минимальной растительностью.

Подготовка к спектральному анализу

После коррекции выполняются методы снижения размерности (PCA, MNF, ICA), позволяющие усилить контраст минералогических аномалий и подготовить данные к применению алгоритмов классификации и расчёту индексов [21].

Особенности обработки в условиях Кыргызской Республики

Высокогорный рельеф Тянь-Шаня характеризуется значительными углами склонов, теневой зональностью и сезонной изменчивостью снежного покрова. В этих условиях обязательны:

- использование DEM для топографической коррекции;
- применение атмосферной коррекции для SWIR-диапазона;
- комбинирование данных ASTER и Landsat;
- использование PCA/MNF для выделения аномалий [12 - 15].

Комплексная предварительная обработка формирует корректную основу для построения минералогических карт.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДЗЗ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Мировая практика применения дистанционного зондирования Земли в минералогии развивается параллельно с совершенствованием мульти- и гиперспектральных сенсоров. Современные исследования основаны на интеграции данных ASTER, Landsat, Sentinel-2, а также гиперспектральных систем Hyperspec, AVIRIS, EnMAP и национальных платформ. Такой подход обеспечивает выявление зон гидротермальной альтерации и повышение точности минералогической диагностики в различных геодинамических условиях.

Северная Америка (США, Канада)

Северная Америка, прежде всего США и Канада, занимает ведущие позиции в развитии гиперспектральных технологий и спектральной минералогии. В регионе сформирована научная школа дистанционного картирования гидротермально изменённых пород и рудных систем.

Ключевым инструментом стал авиационный гиперспектральный сенсор AVIRIS, обеспечивающий детальное выявление диагностических полос поглощения минералов в диапазоне 0.4 – 2.5 мкм. Его применение в штатах Невада, Калифорния и Аризона позволило эффективно картировать эпitherмальные и порфировые системы.

Спутниковый сенсор ASTER широко используется для выделения зон аргиллизации, филлитизации и пропилитизации благодаря информативности SWIR-диапазона. Дополнительно тепловые данные спутника Landsat 8 применяются для анализа термальных аномалий и структурных элементов рудных систем.

Фундаментальные основы спектральной минералогии были в 1990 году заложены работами [1], создавших лабораторные спектральные библиотеки минералов, а также исследованиями [8], выполнившего сравнительный анализ гиперспектральных данных для минералогического моделирования. Эти исследования стали методологической базой алгоритмов SAM, SID и MNF, широко применяемых в современных задачах дистанционного анализа рудных систем.

Австралия

Австралия демонстрирует пример системной интеграции ДЗЗ на государственном уровне. Проект ASTER Mineral Map of Western Australia стал первым опытом создания региональной минералогической карты на основе спутниковых данных [20].

Использование SWIR-диапазона ASTER позволило детально картировать серицит, каолинит и хлорит, а также интегрировать результаты с геохимическими и геофизическими материалами при поиске золоторудных и железорудных объектов.

Китай

Китай активно развивает собственные гиперспектральные космические системы для дистанционного зондирования Земли, ключевые из которых:

- **Гиперспектральный спутник GF-5** — независимая китайская платформа с широким спектральным диапазоном (330 полос) для минералогического анализа и картирования горных пород [28].
- **ZY-1 02D** — спутник серии Ziyouan с гиперспектральными каналами, применяемый для минералогического картирования регионов и полезных ископаемых [29].

Эти платформы позволяют получать высокообъемные спектральные данные, применимые для выделения диагностических минералов и зон изменения горных пород.

Основные направления применения

1). Картирование зон гидротермальных изменений и минералов в полезных ископаемых

— Qi Chen и соавторы использовали данные **GF-5** для определения зон гидротермальных изменений в районе медно-полиметаллических месторождений на Тибете (Tibet) и показали высокую точность распознавания минералов благодаря гиперспектральным данным [30].

2). Интеграция **ASTER + GF-5** для картирования минеральных зон

— В исследовании *ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China* показано, что сочетание **ASTER** (мультиспектральных) и **GF-5** (гиперспектральных) данных эффективно выявляет важные гидротермальные минералы (марганцевые, карбонатные, кварцевые и др.). [31]

3). Экстракция минералов в угледобывающих районах с **ZY-1 02D**

— Использование **ZY-1 02D** для выделения глинистых и карбонатных минералов в угледобывающем бассейне Qinshui продемонстрировало перспективность гиперспектральных данных для предсказания зон изменения и возможных залежей. [29]

Интеграция с другими данными

Важной практикой китайских исследований стало объединение гиперспектральных данных с мультиспектральными улучшенными данными (*Sentinel-2*, *Landsat*, *ASTER*) для повышения точности минералогического картирования и прогноза перспективных зон.

Центральная Азия

Опыт стран Центральной Азии особенно значим ввиду сходства орографических и тектонических условий с Кыргызской Республикой.

Казахстан

- применение *Sentinel-2* для литологического картирования [32, 33].
- использование *Hyperion* для анализа медно-порфировых систем Рудного Алтая [34, 35].

Узбекистан

- применение *Landsat* и *ASTER* для выявления золотоносных и урановых зон в Кызылкуме;
- развитие региональных спектральных методик [10].

Таджикистан

- использование *ASTER SWIR/TIR* для картирования зон альтерации Памира;
- применение *PCA* для выделения скрытых структур [21].

Европа — миссия **EnMAP**

В 2022 г. Германия запустила гиперспектральный спутник **EnMAP** (*Environmental Mapping and Analysis Program*). Аппарат разработан под координацией *German Aerospace Center* и предназначен для детального экологического и геологического мониторинга.

Основные характеристики:

- 242 спектральных канала;
- спектральный диапазон 420–2450 нм (VNIR + SWIR);
- пространственное разрешение ~30 м;
- высокая радиометрическая и спектральная точность.

Такие параметры позволяют регистрировать диагностические полосы поглощения OH-, Al-OH-, Mg-OH- и CO₃-групп, что особенно важно для картирования гидротермальных изменений и карбонатных пород.

Основные направления применения в геологии*1. Картирование серицитизации в Альпа*

Гиперспектральные данные EnMAP используются для выявления зон серицитизации и аргиллитизации в пределах альпийских структур, что важно для оценки гидротермальных систем и прогнозирования рудных проявлений [36].

2. Анализ карбонатно-силикатных комплексов

Благодаря высокой спектральной детализации, EnMAP позволяет различать кальцит, доломит, серпентин и другие минералы по тонким различиям полос CO₃ и Mg-OH [37].

3. Интеграция с национальными геологическими службами

Данные EnMAP интегрируются с материалами европейских геологических служб и программами мониторинга ЕС (в том числе синергия с Sentinel-2). Комбинация мультиспектральных и гиперспектральных данных повышает точность литологического картирования и построения моделей зон изменения [38].

Основные тенденции международного развития

Анализ мирового опыта позволяет выделить устойчивые направления:

1. Использование SWIR-диапазона как основного инструмента диагностики зон гидротермальной альтерации.
2. Активное внедрение гиперспектральных платформ для детальной минералогической дифференциации.
3. Применение многомерных методов обработки (PCA, MNF, ICA).
4. Интеграция ДЗЗ с геофизическими и геохимическими данными.
5. Создание региональных минералогических карт на основе спутниковых данных.

ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В РУДНЫХ СИСТЕМАХ КЫРГЫЗСТАНА

В последние два десятилетия методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в Кыргызской Республике приобрели системный характер. В условиях высокогорного рельефа Тянь-Шаня, сложной транспортной доступности и высокой стоимости детальных полевых работ спутниковые данные стали ключевым инструментом регионального прогноза минерализации и предварительной геологической интерпретации.

Применение мульти- и гиперспектральных данных позволяет решать задачи структурного картирования, выявления зон гидротермальной альтерации, диагностики глинистых, карбонатных и силикатных минералов, а также предварительного прогнозирования рудных объектов. Наиболее широко используются данные ASTER, Landsat 8/9 и Sentinel-2.

Геологический контекст

Территория Кыргызстана характеризуется развитием складчато-надвиговых структур Тянь-Шаня [15], интенсивной разломной тектоникой и широким распространением интрузивных и метаморфических комплексов. Рудные системы (золоторудные, вольфрам - молибденовые, редкоземельные и полиметаллические) пространственно приурочены к глубинным разломам и зонам гидротермальной альтерации.

В этих условиях данные ДЗЗ используются для:

- интерпретации линейных и кольцевых структур;
- выделения зон серицитизации, аргиллитизации и пропилитизации;
- картирования областей развития оксидов железа и карбонатных минералов;
- регионального минералогического картирования.

Применение мультиспектральных систем

ASTER остаётся одной из ключевых систем благодаря наличию SWIR- и TIR-каналов. Его данные используются для картирования зон альтерации в Центральном Тянь-Шане, районах Ак-Тюз и Талды-Булак [12 - 14].

Landsat 7/8/9 обеспечивает длительные временные ряды и применяется для анализа зон окисления, структурных элементов и тепловых аномалий (Джеруй, Талды-Булак-Левобережное, Кара-Балтинский пояс).

Sentinel-2, благодаря высокому пространственному разрешению и SWIR-каналам (B11–B12), широко используется для детального выделения глинистых и карбонатных минералов, а также структурного анализа в Чуйской долине, Иссык-Кульском регионе и Северном Тянь-Шане [14, 15].

Применение спектральных методов

В исследованиях рудных систем Кыргызстана применяются методы SAM, PCA, MNF и спектральные индексы Fe/OH/CO₃ [18].

SAM используется для классификации минералов на основе лабораторных спектров, PCA — для выявления скрытых разломов и аномалий, MNF — для повышения отношения сигнал/шум в сложных условиях рельефа.

Таблица 6.1 обобщает применение различных методов ДЗЗ для основных типов минерализации Кыргызстана.

Таблица 4 - Применение методов ДЗЗ и спектрального анализа для различных типов минерализации в рудных системах Кыргызстана.

| Тип минерализации | Основные районы | Используемые данные ДЗЗ | Методы спектрального анализа | Спектральные признаки |
|------------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|
| Золоторудная (Au) | Кумтор, Джеруй, Чаарат | Landsat 7/8/9, Sentinel-2, ASTER | PCA, SAM, Fe/OH индексы, TIRS | Зоны окисления (Fe), аргиллитизация (OH), зоны кварцевых жил (NIR снижение отражения) |
| Вольфрам-молибденовая (W–Mo) | Ак-Тюз, Талды-Булак | ASTER (SWIR/TIR), Landsat | SWIR индексы, PCA, MNF | Силикатные минералы, серицитизация (2.20–2.22 μm), каолинит (резкое поглощение в |

| | | | | |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| | | | | SWIR), TIR-анализ кварца |
| Редкоземельная (REE) | Северный Тянь-Шань, | ASTER, Sentinel-2, Hyperion (архив) | MNF, SAM, локальные REE индексы | Поглощения в SWIR 2.20–2.45 μm , изменения в спектре Илимское проявление из-за ильменита/апатита, слабые аномалии в VIS–NIR |
| Медь-полиметаллы (Cu–Pb–Zn) | Иссык-Кульский регион, Кара-Балта, Кен-Суу | Landsat TM/OLI, Sentinel-2, ASTER | Fe/OH индексы, PCA, ICA | Смешанные спектральные сигнатуры: оксиды Fe, глинистые фации, следы карбонатизации |
| Антимонитовые зоны (Sb) | Северный Нарынский хребет | Landsat, Sentinel-2 | PCA, SAM | Спектральные признаки сходны с глинами (OH), локальные Fe аномалии |
| Карбонатные тела (карбонатиты) | Иссык-Куль, Түп, Талды Боз-Учук | ASTER SWIR, Sentinel-2 | CO ₂ индексы | Сильные полосы поглощения 2.33–2.35 μm (кальцит/доломит) повышение отражения в VNIR |
| Кварцевые жилы | Во всех рудных районах Тянь-Шаня | Sentinel-2, Landsat, ASTER | TIR PCA, SAM | Резкое увеличение отражения в NIR (0.8–1.0 μm), характерная TIR сигнатура кварца (8–12 μm) |

Основные ограничения

Применение ДЗЗ в Кыргызстане осложняется:

- выраженным топографическим эффектом;
- сезонным снежным покровом и ледниками;
- облачностью;
- ограниченной точностью отдельных DEM;
- недостаточной представленностью локальных спектральных библиотек.

Несмотря на это, комплексное использование данных ASTER, Landsat и Sentinel-2 в сочетании со спектральными методами позволяет эффективно выделять зоны гидротермальной альтерации и уточнять границы минерализованных полей [12].

Перспективы развития

Перспективы развития ДЗЗ в Кыргызстане связаны со следующими направлениями:

1. **Использование гиперспектральных миссий нового поколения (EnMAP и др.)** для детальной диагностики OH- и CO₂-содержащих минералов.
2. **Создание национальной спектральной библиотеки**, включающей эталонные спектры ключевых рудных районов.
3. **Интеграция спутниковых данных с геофизическими материалами** для построения трёхмерных моделей зон альтерации.
4. **Внедрение методов машинного обучения** (Random Forest, нейросети) для автоматизации классификации.

5. Формирование региональной минералогической карты Кыргызстана на основе мультисенсорных данных.

Таблица 5 отражает приоритетные направления дальнейшего развития дистанционных методов.

Таблица 5 – Перспективные направления развития дистанционного зондирования и спектрального анализа в Кыргызстане.

| Направление | Конкретные задачи | Ожидаемые результаты |
|---|---|--|
| Использование гиперспектральных данных нового поколения | Внедрение данных EnMAP, архив Hyperion, Гиперспектральный спутник GF-5, создание гиперспектральных карт | Повышение точности минералогической диагностики; возможность обнаружения скрытой минерализации |
| Создание национальной спектральной библиотеки | Сбор спектров локальных минералов и пород; разработка эталонных библиотек для SAM/SID | Стандартизация анализа; увеличение точности классификаций; снижение ошибок при интерпретации |
| Интеграция ДЗЗ с геофизикой | Объединение магнитной, гравитационной, сейсмической информации | 3D-моделирование зон альтерации; выявление скрытых структурных узлов |
| Машинное обучение и искусственный интеллект (AI) | Применение нейросетей (CNN, U-Net), Random Forest, Gradient Boosting | Автоматизация картирования минералов; повышение производительности анализа |
| Мониторинг техногенных объектов | Наблюдение за карьерами, хвостохранилищами, рудниками с использованием Sentinel-1 (SAR) | Мониторинг оползней, деформаций экологических рисков |
| Региональная минералогическая карта Кыргызстана | Комбинация Sentinel-2, ASTER, Landsat, DEM | Создание единой карты зон альтерации и рудно-металлогенных поясов |
| Международное сотрудничество | Партнёрства с ESA, NASA, METI, китайскими спутниками | Расширение доступа к данным высокой детализации; совместные исследования |

Дальнейшее развитие ДЗЗ в Кыргызстане связано не столько с увеличением объёма данных, сколько с совершенствованием методик обработки, созданием национальной спектральной базы и интеграцией мультисенсорной информации. Реализация этих направлений способна повысить эффективность регионального прогноза и модернизировать геологоразведочные исследования страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что методы дистанционного зондирования Земли и спектрального анализа являются эффективным инструментом изучения рудных систем Кыргызской Республики в условиях сложного высокогорного рельефа Тянь-Шаня и

Памира–Алая. Мульти- и гиперспектральные данные обеспечивают надёжную диагностику зон гидротермальной альтерации, линейных структур и минералогической неоднородности, что существенно расширяет возможности регионального прогноза минерализации.

Диапазоны VNIR–SWIR–TIR обладают высокой информативностью при выявлении глинистых, карбонатных и железосодержащих минералов. Применение методов SAM, PCA, MNF и спектральных индексов Fe/OH/CO₃ повышает объективность классификации и точность выделения зон изменения пород. Международный опыт подтверждает перспективность интеграции мультиспектральных и гиперспектральных данных с современными алгоритмами обработки и машинного обучения.

В условиях Кыргызстана дистанционные методы доказали эффективность при изучении золоторудных, вольфрам - молибденовых, редкоземельных и полиметаллических систем. Их применение способствует уточнению металлогенических моделей, снижению затрат на поисково-разведочные работы и повышению достоверности прогноза рудных объектов.

Перспективы дальнейшего развития связаны с расширением использования гиперспектральных миссий нового поколения, созданием национальной спектральной библиотеки, интеграцией спутниковых данных с геофизическими материалами и внедрением методов искусственного интеллекта. Реализация этих направлений позволит сформировать единую систему дистанционного минералогического картирования и повысить эффективность освоения минерально-сырьевых ресурсов страны.

Таким образом, дистанционное зондирование Земли становится стратегически значимым направлением модернизации геологоразведочных исследований в Кыргызской Республике и важным элементом устойчивого развития её минерально-сырьевого комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., and Swayze, G. A., 1990, High spectral resolution spectroscopy of minerals: *Journal of Geophysical Research*, v. 95, no. B8, p. 12653-12680.
2. Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 847–859.
3. Rowan, L.C., Mars, J.C., Simpson, C. (2005). Lithologic mapping of the Oman ophiolite using ASTER. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 105–126
4. Ninomiya Y., Fu B. (2010). ASTER-based mineralogical mapping for geothermal studies.
5. Hunt, G.R., Ashley, R.P. (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7), 1613–1629.
6. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F. et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
7. Parastatidis, D., et al. (2020). Hydrothermal alteration mapping using Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12, 1123.
8. Kruse, F.A., Boardman, J.W. and Huntington, J.F. (2003) Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1388-1400. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.812908>.
9. Elmira Orynbasarova, Hemayatullah Ahmad, Bakhberde Adebiyet, Alma Bekbotayeva, Togzhan Abdullayeva, Amin Beiranvand Pour, Aigerim Ilyassova, Elmira Serikbayeva, Dinara Talgarbayeva and Aigerim Bermukhanova. (2025) Mapping Alteration Minerals Associated with Aktogay Porphyry Copper Mineralization in Eastern Kazakhstan Using Landsat-8 and ASTER Satellite Sensors. *Minerals* **2025**, 15(3), 277; <https://doi.org/10.3390/min15030277>

10. Makhmudov, F., Karimov (2015). Spectral analysis for gold-bearing structures of Central Asia. *Uzbek Journal of Geology*.
11. Kurmangaliyev, B. (2019). Lithological mapping with Sentinel-2 in Eastern Kazakhstan. *Kazakh Geology Bulletin*.
12. Абдримов А.А., Турдубеков А.Т. (2013). Использование данных Landsat и ASTER для изучения альтерационных поясов Центрального Тянь-Шаня. *Вестник НАН КР. Серия геологи*.
13. Турсунбаев Д.К., Аманбаева М.А. (2017). Применение ДЗЗ для картирования золотосодержащих зон Кыргызстана. *Вестник КНУ. Естественные науки*.
14. Akhmatdinov K., Osmonov S. (2019). Alteration mapping of Ak-Tuz using ASTER SWIR. *Proceedings of IGU KR, Бишкек*.
15. Osmonov S.T. (2021). Remote sensing for rare-metal mineralization in the Tien Shan. *Известия НАН КР. Геология*.
16. Sanginov, S., et al. (2018). Hydrothermal alteration mapping using ASTER in the Pamir region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158, 113–125.
17. Clark, R.N., King, T.V.V., et al. (1993). The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 ***USGS Open-File Report** 93-592.
18. Осмонов С.Т., Ахматдинов К. (2021). Спектральное картирование редкоземельных минералов на данных Sentinel-2. *Вестник ИГН КР*.
19. Ninomiya, Y., Fu, B. (2016). Regional lithologic mapping using ASTER TIR data: Case studies from Tibet. *Geosciences*, 6(3), 39.
20. Hewson R., Cudahy T., et al. (2007). ASTER geological mapping for Broken Hill. *Australian Journal of Earth Sciences*.
21. Hamza A. Mahmouda, Elena V. Karelinaa, Vladimir E. Markova, Viktor V. Diakonovb, Ilya V. Vikentyevc. (2023) Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan. [RUDN Journal of Engineering Researches](https://doi.org/10.3390/rs24(1):95-104) 24(1):95-104
22. Кыргызская Геологическая Служба. Отчёты различных лет.
23. Hewson, R.D., Cudahy, T.J., et al. (2005). Seamless geological map generation using ASTER in Broken Hill–Curnamona province. *Remote Sensing of Environment*, 99, 159–172.
24. Osmonov S.T., Akhmatdinov K. (2021). Alteration mapping in Kyrgyzstan.
25. Yoshiki Ninomiya, Bi-hong FU2 (2003) Extracting lithologic information from aster multispectral thermal infrared data in the northeastern Pamirs, Vol.21, No.1, *Xinjiang GEOLOGY*
26. Michael Abrams, Simon Hook, Jet Propulsion. *ASTER User Handbook Version 2*. Laboratory 4800 Oak Grove Dr. Pasadena, CA 91109 Bhaskar Ramachandran EROS Data Center Sioux Falls, SD 57198
27. EnMAP Science Team (2023). Hyperspectral mineral mapping methods.
28. Kai Ren, Weiwei Sun, Xiangchao Meng, Gang Yang, Qian Du. (2020). Fusing China GF-5 Hyperspectral Data with GF-1, GF-2 and Sentinel-2A Multispectral Data: Which Methods Should Be Used? *Remote Sens.* , 12(5), 882; <https://doi.org/10.3390/rs12050882>
29. Li Chen, Xinxin Sui, Rongyuan Liu, Hong Chen, Yu Li, Xian Zhang and Haomin Chen. (2023) Mapping Alteration Minerals Using ZY-1 02D Hyperspectral Remote Sensing Data in Coalbed Methane Enrichment Areas. *Remote Sens.* , 15(14), 3590; <https://doi.org/10.3390/rs15143590>
30. Chen, Dayu Cai, Jisheng Xia, Min Zeng^c, Haiying Yang, Ruisi Zhang, Yang He, Xiaoxiao Zhang, Yi Chen, Xinhui Xu, Zhifang Zhao. (2025) Remote sensing identification of hydrothermal alteration minerals in the Duobuza porphyry copper mining area in Tibet using WorldView-3 and GF-5 data: The impact of spatial and spectral resolution. *Ore Geology Reviews* 180, 106573
31. Qi Chen, Zhifang Zhao, Jiayi Zhou, Ruifeng Zhu, Jisheng Xia, Tao Sun, Xin Zhao and Jiangqin Chao. ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. *Remote Sens.* 2022, 14, 1253. <https://doi.org/10.3390/rs14051253>

32. Abdrakhmanov, K. et al. (2020). Lithological mapping using Sentinel-2 data in Central Kazakhstan. *Journal of Applied Remote Sensing*. DOI: 10.1117/1.JRS.14.036514
33. Saparov, A., Nurpeisova, M. (2021). Application of Sentinel-2 MSI data for geological mapping in arid regions of Kazakhstan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100524
34. Iskakov, B. et al. (2018). Hyperspectral remote sensing for mapping hydrothermal alteration zones in the Rudny Altai (Kazakhstan). *Ore Geology Reviews*. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.04.012
35. Kassenov, A., Abisheva, Z. (2019). Mineral mapping of porphyry copper systems using EO-1 Hyperion data (Rudny Altai, Kazakhstan). *Remote Sensing*. DOI: 10.3390/rs11182145
36. Guanter, L. et al. (2015). The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission. *Remote Sensing*, 7(7), 8830–8857. DOI:10.3390/rs70908830
37. Kaufmann, H. et al. (2021–2023). EnMAP calibration and validation concept — DLR publications.
38. Stuffer, T. et al. (2007). EnMAP: a hyperspectral satellite mission in preparation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(3–4), 115–120.

Рецензент: д.ф.-м.н. профессор Муралиев А.М.