



Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н.М. Федоровского
(ФГБУ “ВИМС”)

ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ:

**МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ
РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ И
МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**СЕРИЯ:
ПОИСКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Москва 2022 г.

Обзор 3-1
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
 ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

РЕДАКТОР-СОСТАВИТЕЛЬ:
 В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

		стр
	Введение	3
1	Данные дистанционного зондирования	6
2	Спектральная библиотека минералов и горных пород RockSL	12
3	Обработка	28
4	Области применения в поисковых целях	43
5	Примеры использования	54
5.1	<i>Использование ДДЗ при геологическом картировании и поисках (р-н Эль-Бейда, Египет)</i>	54
5.2	<i>Анализ структурных факторов контроля золотого оруденения на основе ДДЗ (р-н Вади-Ходейн, Египет)</i>	62
5.3	<i>Использование данных ASTER при картировании гидротермально-метасоматических изменений (Ю-В пустыня, Египет)</i>	72
5.4	<i>Использование гибридной модели Fuzzy-АНР ДДЗ для выявления зон гидротермальных изменений, связанных с медно-порфировыми системами (р-н Симорг, Иран)</i>	82
5.5	<i>Данные ASTER при поисках медно-порфировых месторождений (медный пояс Кермана, Иран)</i>	90
5.6	<i>Картирование медьсодержащих жил на основе ДДЗ с БПЛА (р-н Шахзаде-Аббас, Иран)</i>	99
5.7	<i>Использование ДДЗ при поисках IOGC месторождений (Гренландия)</i>	105
5.8	<i>Картирование радиоактивной минерализованной литологии на основе ДДЗ (р-н Нарсак, Гренландия)</i>	113
5.9	<i>Методика обработки ДДЗ при поисках бокситов в риголите (Индия)</i>	126
	Источники	130

Введение.

Технологии дистанционного зондирования используются уже более семи десятилетий, но для разведки полезных ископаемых они набрали быстрые обороты с появлением первых аэрофотоснимков, их сравнения и сопоставления с местоположением различных месторождений. Спутниковые системы дистанционного зондирования суши и океана значительно расширили возможности по исследованию, подтверждению и управлению запасами энергии и минеральных ресурсов во всем мире. Спутниковое дистанционное зондирование в сочетании с другими методами доказало экономию затрат и снижение поисковых рисков за счет лучшего геологического картирования. Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) повысило свою эффективность с внедрением и модернизацией структурно-литологической картографии ГИС во всех рудных районах мира. Современные датчики нового поколения могут эффективно отображать литологические единицы и определять изменения в горных породах, почвах и растительном покрове, свидетельствующие о скрытых рудных объектах.

Важнейшим элементом технологии дистанционного зондирования являются гиперспектральные датчики, разработанные многими космическими агентствами по всему миру. Они снимают изображения поверхности в сотнях диапазонах. Их преимущество заключается в предоставлении спектральной сигнатуры для каждого пикселя изображения. Данные гиперспектрального дистанционного зондирования являются геологическим инструментом для поисков полезных ископаемых, выявления и картирования набора минералов, связанных с месторождениями полезных ископаемых, с использованием алгоритмов спектрального сопоставления. Наблюдаемый спектр поверхности вызывается множеством комбинаций различных факторов. При ДДЗ фактический спектр интерпретируется датчиками с использованием «ключей интерпретации», а именно тон/цвет, текстура, форма, узор, ассоциации и др. Сопоставление лабораторных и/или полевых спектров отражения минералов с пиксельными спектрами является непосредственным поисковым методом для ряда полезных ископаемых.

Тип ДДЗ, необходимых для разведки полезных ископаемых зависит от различных факторов, в том числе таких как масштаб картографирования, тип исследуемой местности, целевые полезные ископаемые и поисковая стадия. При поисках используются спутниковые данные низкого пространственного разрешения 50-100 м, среднего ~ 25 м и высокого ~ 5 м.

Основным недостатком ДДЗ при поисках полезных ископаемых является недостаточная глубина проникновения. Большинство геологических полей плохо обнажены из-за растительности и снежного покрова. Гиперспектральное дистанционное зондирование

имеет ограничения в районах, где отсутствует хорошая экспозиция эрозионно-денудационной поверхности, в том числе и из-за растительного покрова. В таких случаях, когда прямая идентификация минералов затруднена, может быть полезен метод геоботанического картирования (здесь не обсуждается). Большинство проведенных исследований проводились в засушливых или полузасушливых районах лишенных растительности.

ДДЗ представляют собой мощный инструмент для выявления вариаций поверхностной минералогии, структурных элементов и геологических контактов. Визуальная интерпретация и количественная обработка изображений, включая соотношение полос и анализ основных компонентов в сочетании с полевыми исследованиями могут быть успешными при литологическом картировании. Минералы и горные породы часто имеют отличительные спектральные модели, которые можно использовать, чтобы отличить их от других спектральных моделей с использованием различных методов обработки изображений, таких как соотношение полос, анализ главных компонентов (РСА) и различные методы классификации, например, классификация максимального правдоподобия (MLC) и др.

Гидротермальные флюиды вступают в реакцию с вмещающими породами и изменяют их минералогический и химический состав. Эти изменения приводят к появлению измененных минералов в горных породах, придавая им уникальные спектральные характеристики. Изображения с различных спутников используют для обнаружения измененных пород, связанных с рудной минерализацией.

Дистанционное зондирование осуществляется с использованием датчиков, измеряющих отраженное или испускаемое электромагнитное излучение (ЭМИ). В целом дистанционное зондирование включает семь этапов (рис. 1):

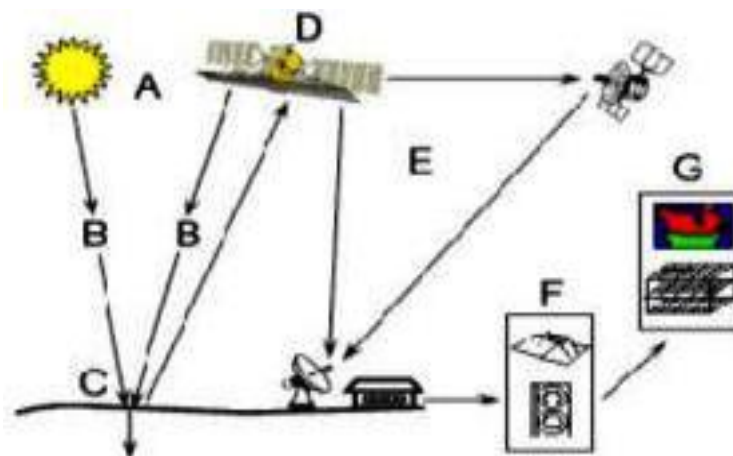


Рис. 1: Этапы дистанционного зондирования. *Источник энергии или освещение (A) Радиация и атмосфера (B) Взаимодействие с целью (C) Запись энергии датчиком (D) Передача, прием и обработка (E) Интерпретация и анализ (F) Применение (G)*

В последние годы технологии дистанционного зондирования значительно продвинулись в разведке месторождений полезных ископаемых. Применение датчиков, таких как ASTER, Landsat ETM + / OLI и Sentinel-2 MSI, является обычным явлением в большинстве компаний осуществляющих ГРП. ДДЗ часто применяется на начальных этапах программ поисков. Эти исследования могут быть непосредственно сосредоточены на картировании минералов с использованием инструментов мультиспектральной/гиперспектральной визуализации, таких как ASTER и Hyperion. Некоторые ДДЗ, такие как Landsat ETM+/OLI, Sentinel, SPOT и IRS, могут быть использованы для геологического и структурного картирования. Данные гиперспектрального дистанционного зондирования позволяют картировать минералы-индикаторы, связанные с оруденением, и, таким образом, помочь в локализации ГРП при значительной экономии затрат.

1. Данные Дистанционного Зондирования.

Диапазоны в ЭМИ имеют первостепенное значение, как и видимая область в диапазоне 0,4–0,7 мкм (синий: 0,4–0,5 мкм, зеленый: 0,5–0,6 мкм, красный: 0,6–0,7 мкм). Другие полосы включают ультрафиолетовую (УФ) область (примыкает к синей), инфракрасный (ИК) диапазон (примыкает к красному), микроволновый диапазон (более длинные интервалы длин волн колеблются от 0,1 до 100 см и т. д.). Изображения собираются либо с помощью датчиков с синтетической апертурой, либо с помощью оптических датчиков. Датчики с синтетической апертурой могут воспринимать электромагнитные данные, передавая микроволны и принимая отраженные волны от поверхности Земли, в то время как оптические датчики измеряют спектральные данные солнечного света, отраженного от поверхности Земли.

В настоящее время имеется ряд космических спектрометров. Характеристики некоторых гиперспектральных сенсоров приведены в таблице-1.

Табл. 1: Характеристики некоторых гиперспектральных датчиков

Satellite Sensors	Manufacturer	Number of Bands	Spectral Range
FTHSI on MightySat II	Air Force Research Lab	256	0.35 to 1.05 mm
Hyperion on EO1	NASA Goddard Space Flight Center	220	0.4 to 2.5 mm
Airborne Sensors	Manufacturer	Number of Bands	Spectral Range
AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab	224	0.4 to 2.5 mm
HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)	Naval Research Lab	210	0.4 to 2.5 mm
PROBE-1	Earth Search Sciences Inc.	128	0.4 to 2.5 mm
casi (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited	up to 228	0.4 to 1.0 mm
HyMap	Integrated Spectronics	100 to 200	Visible to thermal infrared
EPS-H (Environmental Protection System)	GER Corporation	VIS/NIR (76), SWIR1 (32), SWIR2 (32), TIR (12)	VIS/NIR (.43 to 1.05 mm), SWIR1 (1.5 to 1.8 mm), SWIR2 (2.0 to 2.5 mm), and TIR (8 to 12.5 mm)
DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation	VIS/NIR (32), SWIR1 (8), SWIR2 (32), MIR (1), TIR (6)	VIS/NIR (0.43 to 1.05 mm), SWIR1 (1.5 to 1.8 mm), SWIR2 (2.0 to 2.5 mm), MIR (3.0 to 5.0 mm), and TIR (8.7 to 12.3 mm)
DAIS 21115 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation	VIS/NIR (76), SWIR1 (64), SWIR2 (64), MIR (1), TIR (6)	VIS/NIR (0.40 to 1.0 mm), SWIR1 (1.0 to 1.8 mm), SWIR2 (2.0 to 2.5 mm), MIR (3.0 to 5.0 mm), and TIR (8.0 to 12.0 mm)

Landsat-8 был запущен в 2013 году с авиабазы Ванденберг в Калифорнии. Этот космический аппарат с двумя датчиками: оперативным наземным тепловизором (OLI) и тепловым инфракрасным датчиком (TIRS). Эти два прибора собирают изображения для девяти видимых, ближних инфракрасных и коротковолновых инфракрасных диапазонов и двух длинноволновых тепловых диапазонов (рис. 2). Они имеют высокие характеристики отношения сигнал-шум, что позволяет проводить 12-битную количественную оценку данных, что обеспечивает большее количество битов для более точного определения характеристик земной поверхности. *Landsat-8* обеспечивает снимки земной поверхности среднего разрешения от 15 до 100 м.

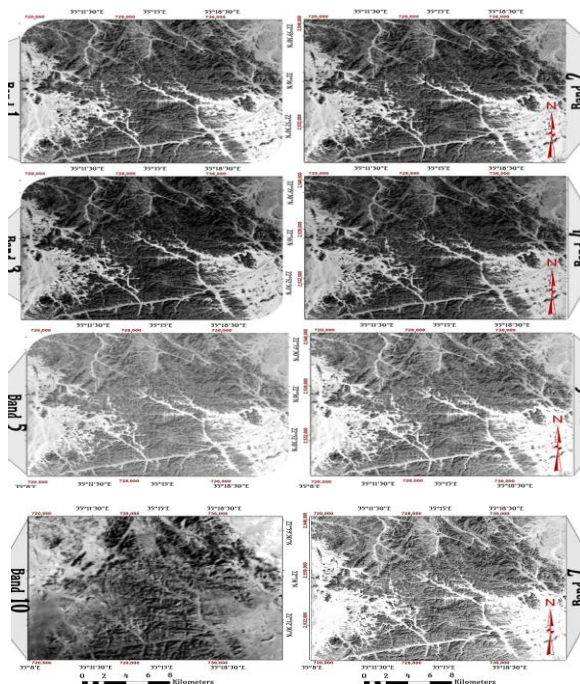


Рис. 2 Диапазоны Landsat-8 OLI

1. $0,43 - 0,45$ мкм, (береговой/аэрозольный) - для визуализации мелководья и отслеживание мелких частиц, таких как пыль и дым. Диапазон 1 позволяет использовать прибрежные наблюдения за цветом воды и его интенсивностью для возможного определения объема и состава примесей.

2. $0,45-0,51$ мкм, (синий 30 м) - для мониторинга водных экосистем (картирование отложений в воде, мест обитания коралловых рифов, батиметрическое картирование); картирования почв и растительности (лиственной или хвойной и др.). Это самый «шумный» из диапазонов Landsat, так как он наиболее восприимчив к атмосферному рассеянию.

3. $0,53-0,59$ мкм, (зеленый 30 м) – для диагностики типа растительности и ее интенсивности.

4. 0,64 - 0,67 мкм, (красный 30 метров) - (его иногда называют полоса поглощения хлорофилла) для диагностики видов растительности и почв, мониторинг здоровья растительности.

5. 0,85–0,88 мкм, (ближний инфракрасный диапазон (NIR)) 30 метров) - для определения обводненности. Подчеркивает содержание биомассы и береговые линии.

6. 1,57 - 1,65 мкм, (коротковолновый инфракрасный SWIR 1 30 метров) - для мониторинга влажности растительности и почв. Хорошо различает облака и снег. Определяет содержание влаги в почвах и растительности.

7. 2,11 - 2,29 мкм, (коротковолновый инфракрасный SWIR 2 30 метров) - предпочтительно для геологической картографии.

Landsat-8 OLI с высоким радиометрическим разрешением (16 бит) является эффективным датчиком дистанционного зондирования для детального литологического картирования. Снимки Landsat-8 OLI состоят из девяти спектральных полос, из которых семь полос измеряют отраженное излучение VNIR и SWIR с пространственным разрешением 30 м для полос 1-7 и 9, в то время как панхроматическая полоса 8 имеет разрешение 15 м. Ультра-синяя полоса 1 работает в прибрежных и аэрозольных целях, в то время как полоса 9 ценится для обнаружения облаков.

Sentinel-2 несет суперспектральный солнечно-синхронный инструмент с дальностью 786 км (рис. 3, 4). Мультиспектральный аппарат *Sentinel-2* оснащен широкоугольным датчиком с высоким пространственным разрешением. Орбита позволяет охватить поверхность суши и прибрежные воды между -56 и $+84$ градусами широты с шириной полосы обзора 290 км при 10-дневном времени нахождения на экваторе (5-дневное время нахождения на экваторе на основе 2 спутников, которые будут летать одновременно) Миссия *Sentinel-2* в первую очередь предназначена для исследования земной поверхности, в том числе для геологического картирования с обнаружением изменений в горных породах. Доступны два типа данных оптического дистанционного зондирования: гиперспектральные и мультиспектральные. Съемки «Гиперион» - наиболее эффективные гиперспектральные данные, используемые в геологических целях, но они не покрывают всю территорию земного шара. Мультиспектральные данные с полным глобальным охватом. *Sentinel-2* имеют лучшее пространственно-спектральное разрешение и соотношение сигнал/шум среди доступных мультиспектральных данных. Обычно прямая идентификация и количественная оценка минералов возможна по местоположению, форме и величине ключевых характеристик поглощения в спектрах отражения. Эти особенности могут быть более точно извлечены из гиперспектральных или ультраспектральных данных, в то время как они отсутствуют или плохо заметны в мультиспектральных данных.

Картирование минералов с использованием мультиспектральных данных Sentinel-2 обычно выполняется с использованием косвенных методов, таких как преобразование и индексация данных или выделение признаков. Интеграция данных Sentinel-2 с другими данными является необходимой для повышения достоверности при картировании минерального потенциала.

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (µm)	Resolution (m)	Heritage	Purpose
Band 1 - Coastal	0.443	60	MODISa, ALIa, LS8a	Atm. correction (aerosol scattering)
Band 2 - Blue	0.49	10	MERISa, LS8, LS7	Vegetation senescing, carotenoid, browning and soil background; atm. correction (aerosol scattering)
Band 3 - Green	0.56	10	MERIS, LS8, LS7, SPOT5a	Green peak, sensitive to total chlorophyll in vegetation
Band 4 - Red	0.665	10	MERIS, LS8, LS7	Max. chlorophyll absorption
Band 5	0.705	20	MERIS	Red edge position; consolidation of atmospheric corrections/fluorescence baseline.
Band 6	0.74	20	MERIS	Red edge position; atmospheric correction; retrieval of aerosol load
Band 7	0.783	20	MERIS, ALI	LAIb; edge of the NIR plateau
Band 8 - NIR	0.842	10	Landsat, SPOT5	LAI
Band 8	0.865	20	MERIS, ALI, Landsat 8	NIR plateau, sensitive to total chlorophyll, biomass, LAI and protein; water vapour absorption reference; retrieval of aerosol load and type
Band 9	0.945	60	MODIS, MERIS	Atm. correction (water vapour absorption)
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60	MODIS, LS8	Atm. correction (detection of thin cirrus)
Band 11 - SWIR	1.61	20	LS8, SPOT5, LS7	Sensitive to lignin, starch and forest above ground biomass; snow/ice/cloud separation
Band 12 - SWIR	2.19	20	LS8, LS7	Assessment of Mediterranean vegetation conditions; distinction of clay soils for monitoring of soil erosion; distinction between live biomass, dead biomass and soil, e.g. for burn scars mapping

Рис. 3 Информация о диапазонах Sentinel-2

ASTER - усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения является совместной работой между НАСА и Министерством экономической торговли и промышленности Японии (METI). В 1999 году прибор был запущен на борту космического корабля НАСА «Терра». Мультиспектральная спутниковая система ДЗЗ АСТЕР состоит из трех отдельных подсистем (всего 14 диапазонов): (1) подсистема видимого ближнего инфракрасного диапазона (VNIR) получает оптические изображения трех полос (от 0,52 до 0,86 мкм) с пространственным разрешением 15 м; (2) коротковолновая инфракрасная (SWIR) подсистема сканирует оптические изображения шести полос (от 1,60 до 2,43 мкм) с пространственным разрешением 30 м; и (3) подсистема теплового инфракрасного излучения (TIR) получает оптические изображения пяти полос (от 8,12 до 11,65 мкм) с пространственным разрешением 90 м. Кроме того, ASTER записывает данные в полосе 3В (0,76–0,86 мкм) с помощью телескопа обратного обзора VNIR, который позволяет рассчитать цифровую модель рельефа (ЦМР). Кроме того, испускаемая радиация измеряется на 90-м разрешении в пяти диапазонах в диапазоне длин волн теплового инфракрасного излучения (TIR) 8,125–11,65 мкм. Ширина полосы обзора составляет 60 км, но возможности наведения ASTER увеличивают общую дальность обзора до 232 км. (табл. 2).

Таб. л. 2 Спектральные полосы Aster.

Band	Reflected Range (µm)	Spatial Resolution (m)	Band	Reflected Range (µm)	Spatial Resolution (m)
1	0.52–0.60	15 m	8	2.295–2.365	30 m
2	0.63–0.69	15 m	9	2.360–2.430	30 m
3N	0.78–0.86	15 m	10	8.125–8.475	90 m
3B	0.78–0.86	15 m	11	8.475–8.825	90 m
4	1.600–1.700	30 m	12	8.925–9.275	90 m
5	2.145–2.185	30 m	13	10.25–10.95	90 m
6	2.185–2.225	30 m	14	10.95–11.65	90 m
7	2.235–2.285	30 m			

Благодаря своим спектральным возможностям и бесплатному доступу изображения ASTER нашли множество применений при поисках минеральных ресурсов за последние три десятилетия. Среди них заслуживают внимания исследования способности вихревых полос идентифицировать минералы гидротермального изменения, такие как алунит, каолинит, кальцит, доломит, хлорит и мусковит. Кроме того, данные VNIR и TIR могут идентифицировать растительность и оксиды железа в верхнем слое почвы, а также карбонаты и силикаты соответственно. Учитывая, что пространственное разрешение в диапазоне TIR составляет 90 м, можно идентифицировать породы с высокой кремнистостью и выходами 90 м или более.

Данные усовершенствованного космического радиометра тепловой эмиссии и отражения (ASTER) показали высокие возможности в распознавании литологических единиц и зон изменения, связанных с гидротермальными рудными месторождениями

PALSAR - технология дистанционного зондирования с помощью радара с синтезированной апертурой (SAR) позволяет применять данные космических снимков для детального картирования структурной геологии. Радар с синтезированной апертурой L-диапазона с фазированной антенной решеткой может проникать сквозь песок и растительность из-за более длинных волн радара (15,0-30,0 см). Данные SAR L-диапазона могут предоставить подробную информацию о геологическом строении для пустынных и тропических сред. PALSAR имеет многорежимные функции наблюдения, такие как точный режим, прямая нисходящая линия связи, режим сканирования и поляриметрический режим. Разработана конфигурация мультиполяризации (HH, HV, VH и VV), переменный угол отклонения от надира (9,9–50,8 °) и пространственное разрешение 10 м для точного режима, 30 м для поляриметрического режима, 100 м для режима Скансара. Ширина полосы наблюдения составляет 30 км для поляриметрического режима, 70 км для точного режима и 250-350 км для режимов сканирования. Объединение этих данных мультисенсорных изображений может предложить широкий спектр средств для отслеживания простирающихся структурных элементов.

Настоящее исследование объединяет данные Landsat-8 OLI / TIRS, ASTER и ALOS PALSAR для всестороннего картирования литологических единиц и геологических структур. Кроме того, мы стремились обнаружить минерализованные зоны в районе Вади-Ходейн. Характеристики использованных данных дистанционного зондирования представлены в таблицах 3, 4 и на рис. 4.

Табл. 3. Характеристики данных Landsat-8 OLI/TIRS и ASTER

Landsat-8 (OLI/TIRS)			ASTER		Band
Band	Resolution (m)	Wavelength (μm)	Resolution (m)	Wavelength (μm)	
Band 1	30 Coastal/Aerosol	0.435–0.451	15	0.52–0.6	Band1
Band 2	30 Blue	0.452–0.512	15	0.63–0.69	Band 2
Band 3	30 Green	0.533–0.590	15	0.76–0.86	Band 3
Band 4	30 Red	0.636–0.673	30	1.60–1.70	Band 4
Band 5	30 NIR	0.851–0.879	30	2.145–2.185	Band 5
Band 6	30 SWIR-1	1.566–1.651	30	2.185–2.225	Band 6
Band 7	30 SWIR-2	2.107–2.294	30	2.235–2.285	Band 7
Band 8	15 Pan	0.503–0.676	30	2.295–2.365	Band 8
Band 9	30 Circus	1.363–1.384	30	2.360–2.430	Band 9
band10	100 TIR-1	10.60–11.19	90	8.125–8.475	Band 10
band11	100 TIR-2	11.50–12.51	90	8.475–8.825	Band 11
-	-	-	90	8.925–8.275	Band 12
-	-	-	90	10.25–10.95	Band 13
-	-	-	90	10.95–11.65	Band 14

Табл. 4. Характеристики данных ALOS PALSAR

	Fine Resolution	ScanSAR	Polarimetric
Beam Mode	FBS, DSN	FBD	PLR
Center Frequency	L-Band (1.27 GHz)		
Polarization	HH or VV	HH + HV or VV + VH	HH + HV + VV + VH
Spatial Resolution	10 m	20 m	30 m
Swath Width	70 km	70 km	30 km
Off-Nadir Angle	34.3° (default)	27.1° (default)	21.5° (default)

Abbreviation: DSN = Direct Downlink, FBD = Fine Resolution Mode, Dual polarization, PLR = Polarimetry, HH, VV, HV, VH = Polarization types.

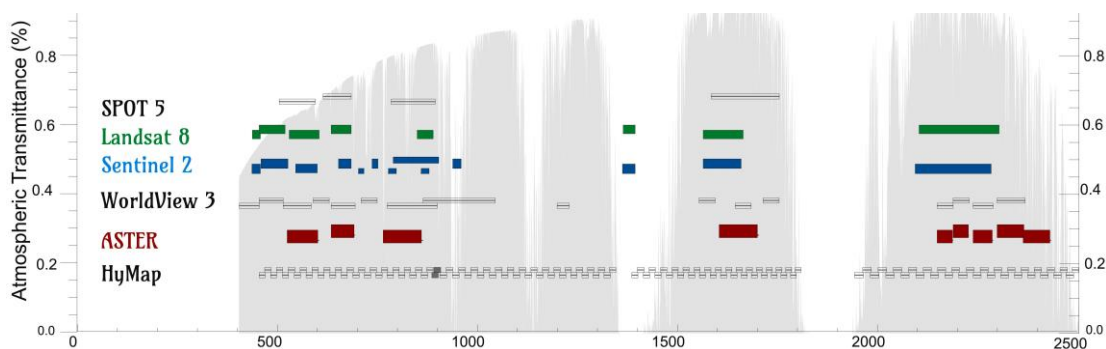


Рис. 4 Сравнение Landsat 8, Aster и Sentinel-2. Предлагаемые диапазоны датчика Sentinel-2 в сравнении с действующими датчиками SPOT, Landsat 8, ASTER и HyMAP и предлагаемыми диапазонами датчика Worldview 3. Коэффициент пропускания атмосферы отложен по оси Y.

2. Спектральная библиотека минералов и горных пород RockSL.

Многие инструментальные методы анализа горных пород и минералов являются дорогостоящими и трудоемкими. Видимая и инфракрасная спектроскопия - это относительно быстрый, экономичный и работающий в режиме реального времени метод определения характеристик минералов и горных пород с помощью ДДЗ.

Многие исследования показали, что спектры отражения в видимом и инфракрасном диапазонах могут характеризовать физические свойства и химический состав горных пород и минералов. В зависимости от диапазона длин волн, гиперспектральная технология состоит из видимой-ближней инфракрасной области (0,45–1,1 мкм), коротковолновой инфракрасной области (1,1-2,5 мкм), средней инфракрасной области до тепловой инфракрасной области (2,5–14 мкм) и дальней инфракрасной спектроскопии. Спектроскопия представляет различные механизмы реакции на минералы в разных диапазонах длин волн, такие как электронные процессы ионов металлов (например, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{2+}) в видимом ближнем инфракрасном диапазоне, удвоенную и совместную частоту молекулярных колебаний гидроксильных минералов (например, глинистых минералов, карбонатов, гидратированных сульфатов) в коротковолновом инфракрасном диапазоне и основную частоту молекулярных колебаний минералов, не содержащих гидроксила (например, силикатов, карбонатов, сульфат) в тепловом инфракрасном диапазоне.

Мульти- и гиперспектральные минералогические данные, полученные с помощью полевых и дистанционных измерений, в основном хранятся в различных спектральных библиотеках (рис. 5).

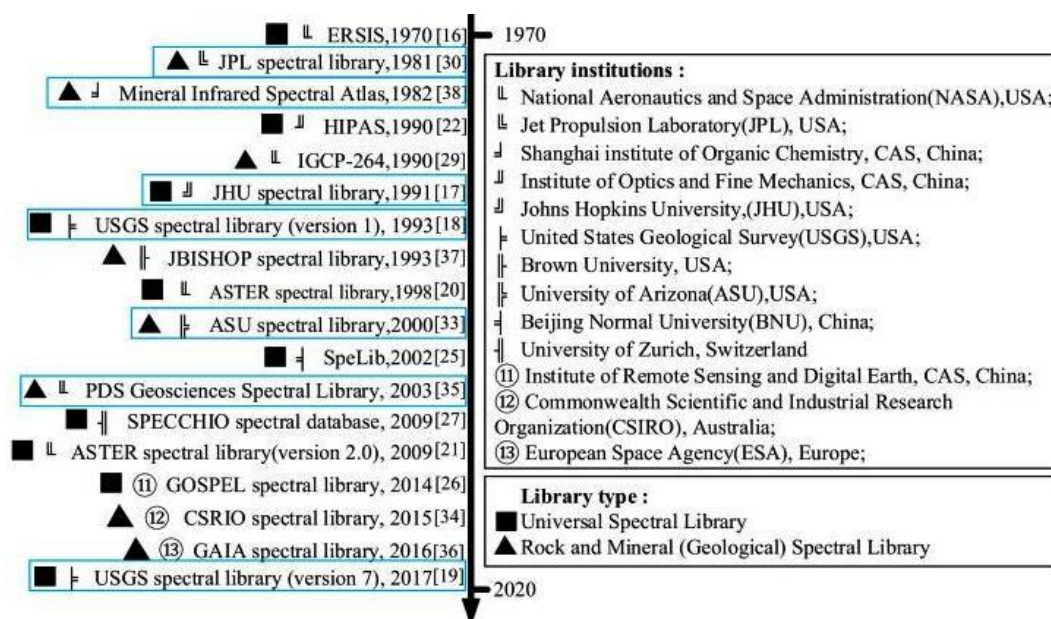


Рис. 5. Минералогические спектральные библиотеки (спектральные библиотеки, используемые для создания RockSL, отмечены синим прямоугольником).

На Рисунке 5 показана краткая информация о репрезентативных минералогических спектральных библиотеках по всему миру. С 1970-х годов многие исследовательские группы создали отдельные спектральные базы данных для различных областей. С 2010 года спектральные библиотеки Геологической службы США (USGS) и Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer (ASTER) (как наиболее репрезентативные библиотеки наземных объектов во всем мире) упоминаются в среднем более 200 раз в год, что свидетельствует о широком признании спектральных библиотек в научных исследованиях. Однако доступность существующих общих библиотек ограничена особой репрезентативностью выборки, семантическими различиями, условиями тестирования и форматами совместного использования, что затрудняет широкое совместное использование спектральных данных о горных породах и минералах.

Спектральные библиотеки можно разделить на универсальные и специализированные, то есть спектральные библиотеки горных пород и минералов (геологических). универсальные спектральные библиотеки (например, Система спектральной информации о ресурсах Земли (ERSIS), Университет Джона Хопкинса (JHU), USGS, ASTER, Система обработки и анализа гиперспектральных изображений (HIPAS), Спектральная библиотека (SpeLib), фоновая спектральная библиотека наземных объектов (ЕВАНГЕЛИЕ), спектральная библиотека СПЕККИО представляют собой коллекции богатых типов наземных объектов из окружающей среды, обеспечивая базовую платформу данных для геонаук и исследований экологической среды. Спектры направленного полусферического отражения природных материалов земной поверхности были обобщены в спектральную библиотеку JHU для изучения взаимосвязи дистанционно регистрируемого инфракрасного излучения и физических/химических свойств почвенного покрова. Библиотека спектров USGS, измеренных лабораторными, полевыми и бортовыми спектрометрами, была создана для идентификации компонентов неизвестного спектра и поддержки исследований спектроскопии изображений на Земле и других планетах. На основе широкого применения ASTER на платформе Terra НАСА библиотека ASTER была составлена из более чем 2000 спектров природных и искусственных материалов, чтобы обеспечить одну из наиболее полных коллекций, включая материалы Лаборатории реактивного движения (JPL), JHU и Геологической службы США. HIPAS был разработан Институтом прикладных программ дистанционного зондирования Китайской академии наук (CAS) на основе приложений модульного спектрометра аэрофотосъемки (MAIS) и гиперспектрального тепловизора push-broom (PHI) для поддержки идентификации полезных ископаемых, исследований в сельском хозяйстве, составления карт городов и изучения водно-болотная растительность. SpeLib типичных объектов в Китае был совместно создан Пекинским педагогическим

университетом и CAS, охватывающий растительность, горные породы, минералы и воду и обеспечивающий поддержку сельскохозяйственного мониторинга, мониторинга качества воды и литологии-идентификации минералов. ЕВАНГЕЛИЕ расширило содержание SpeLib, включив в него больше спектральных данных наземных объектов, собранных по растительности, воде, почве, камням и минералам, снегу и льду, а также искусственным целям и наборам характеристических данных для полнодиапазонных, многомасштабных, многоугловых и временных рядов направлений. База данных SPECCHIO (как хранилище данных спектрорадиометра и связанных с ними метаданных) была создана Лабораториями дистанционного зондирования Цюрихского университета, которая обеспечивает платформу для обмена данными о спектральных сигнатурах и обмена данными.

Хотя универсальные библиотеки содержат высококачественные спектры многочисленных мишеней (в основном минералов), они в основном включают статистическую информацию первого порядка (т.е. один репрезентативный спектр на мишень) вместо статистики второго порядка, что создает серьезные ограничения на практическое использование описанной вариации. Поэтому фокус создания спектральной библиотеки постепенно сместился с универсальной спектральной библиотеки на специализированную спектральную библиотеку, уделяя больше внимания исследованию и извлечению спектральных знаний. Созданные соответствующие библиотеки спектральных данных горных пород и минералов могут быть использованы для проверки влияния условий измерения (например, угла, полосы частот и разрешения и т.д.), размера образца, минеральной чистоты и геологической среды на спектральные характеристики.

Международная программа геологической корреляции (проект IGCP-264), состоящая из спектров отражения, измеренных 5 спектрометрами для 26 распространенных минералов с различным спектральным разрешением, может быть применена для автоматической идентификации геологических материалов на основе их спектральных характеристик в данных спектрометра визуализации от бортового спектрометра видимого/инфракрасного изображения (АВИРИС). JPL возглавила разработку стандартной базы спектральных данных минералов, в которой 135 минералов были отобраны в соответствии с тремя шкалами размеров частиц для изучения влияния размера минеральных частиц на отражательную способность. The mineral infrared atlas, который охватывает длины волн от видимого ближнего инфракрасного диапазона до среднего инфракрасного диапазона (0,3-4 мкм), библиотека тепловых инфракрасных спектров Университета штата Аризона (ASU), которая охватывает длины волн от среднего инфракрасного диапазона до дальнего инфракрасного диапазона (5-45 мкм), а также научные и промышленные исследования Содружества Организация спектральной библиотеки, который охватывает длины волн от

среднего инфракрасного диапазона до дальнего инфракрасного диапазона (2-25 мкм), были созданы для получения инфракрасной информации о горных породах/минералах и поисков полезных ископаемых. Спектральные библиотеки планетарной геологии (например, PDS и Gaia spectral library, содержащие спектральные данные Земли и других планетарных материалов, широко используются в планетарной геологии и астрономии.

Как правило, существующие спектральные библиотеки собирали образцы горных пород или минералов в местном масштабе, а не в глобальном масштабе, пренебрегая геологической средой. Универсальные библиотеки уделяют больше внимания широте возможностей геологического картирования и мониторинга с помощью дистанционного зондирования, в то время как специализированные библиотеки сосредоточены на спектрах и описательных метаданных для проверки взаимосвязи спектральных данных и внутренних атрибутов/внешних условий. Кроме того, библиотеки публикуются в разных форматах (например, ASCII и файл изображения) и семантическом содержании (например, на английском и китайском языках), что приводит к ненужным пробелам в данных. Чтобы избежать пробелов в данных различных библиотек и улучшить использование спектральных данных, RockSL создается путем интеграции массивных данных из разнообразных общих спектральных библиотек, консолидации формата общих спектральных данных для создания всеобъемлющего, стандартизированного и глобального набора данных, а также разработке операционной системы для интеграции различных методов идентификации для упрощения обмена и сопоставления услуг. Объединяется семантическое значение по всему миру, создавая таблицу минералов и горных пород на разных языках, что способствует созданию большого набора данных о спектрах горных пород/минералов. Предоставляется справочная схема для реализации интеграции данных в нескольких форматах и представляется рабочий процесс и ключевые технологии, чтобы исследователи могли создавать свои собственные спектральные библиотеки. Демонстрируется полезность RockSL для распознавания минерального состава неизвестных пород. Спектральное сопоставление, основанное на RockSL, способно повысить эффективность и точность идентификации породы/минерала.

База данных RockSL состоит из общих данных из открытых библиотек и данных полевых проб на Земле и в настоящее время содержит более 200 образцов минералов, 50 подклассов минералов и более 3500 спектров, предоставляя пользователям исходную информацию для справки.

Общие спектральные библиотеки.

RockSL представляет собой сборник материалов в стандартном формате с репрезентативными спектральными библиотеками, включая некоторые универсальные

спектральные библиотеки (например, спектральные библиотеки USGS, JHU и JPL) и специализированные библиотеки, такие как Тепловая инфракрасная спектральная библиотека ASU, Спектральная библиотека PDS Geoscience и Минеральный инфракрасный спектральный (MIS) Атлас. Параметры измерения, которые различаются в каждой спектральной библиотеке, подробно рассмотрены в таблице 5.

Табл. 5. Основные данные об измерениях общих библиотек, интегрированных в RockSL.

Spectral Library	Wavelength Range	Particle Size	Instrument	Storage Format	Spectra Amount	Data Resource
USGS [19]	0.2–200 μm	μm level	Beckman 5270, ASD, Nicolet, AVIRIS etc.	text files and related information	2468	Laboratory and Field and Airborne
JPL [30]	0.4–2.5 μm	<45 μm , 45–125 μm , 125–500 μm	Beckman UV5240	Spectrum.txt and ancillary.txt	3104	Laboratory
JHU [17]	0.4–14 μm 2.08–25 μm	μm level	/	Spectrum.txt and ancillary.txt	3104	Laboratory
PDS [35]	0.3–26.0 μm	μm level	/	Tab file	826	Laboratory
ASU [33]	5.0–45 μm	710–1000 μm	Beckman, ASD,	HDF/text file	150	Laboratory
MIS Atlas [38]	0.25–5.0 μm	/	/	images	583	Laboratory

Спектральные данные, загружаемые из спектральных библиотек JPL и JHU, в основном идентичны.

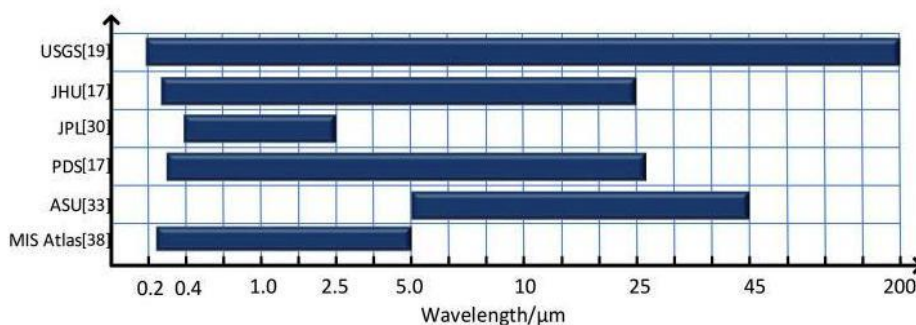


Рисунок 6. Диапазон длин волн общих спектральных библиотек.

Сравнение диапазонов длин волн разделяемых библиотек (рис. 6) показывает, что RockSL охватывает полный спектральный диапазон различных минералов и горных пород. В соответствии с вспомогательными параметрами нескольких общих спектральных библиотек разработали соответствующую таблицу спектральных данных, включающую названия образцов на английском и китайском языках, спектральные данные, измеренные параметры, типы минералов и пород, а также оригинальные описания из общих баз данных.

Данные полевых проб

Спектральные данные в RockSL включают в себя не только общие данные отражательных спектров из общих спектральных библиотек, но и спектры образцов горных пород/минералов, полученные в результате лабораторных измерений. Образцы (например, уголь, железо и пиролизит) были собраны из Северного и Центрального Китая и измерены в Центральном Южном университете и Северо-Восточном университете в Китае. Учитывая разницу в условиях измерения между общими данными из нескольких спектральных библиотек и измеренными данными в лаборатории, была создана стандартная модель

параметров записи данных для обеспечения долгосрочного использования данных и обмена ими. Система совместной работы и требуемые параметры RockSL показаны на рисунке 7.

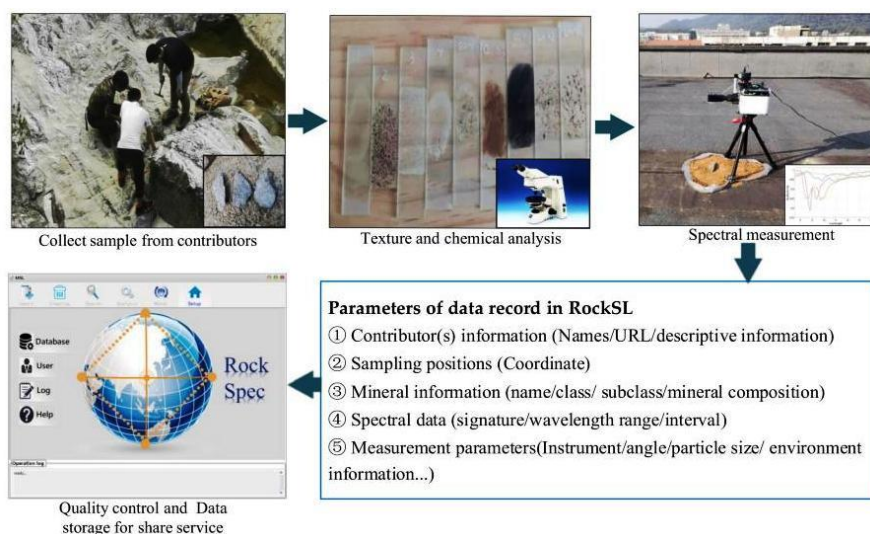


Рис. 7. Методологическая последовательность разработки библиотеки спектров горных пород (RockSL) с использованием данных выборки и требованием предоставления данных.

Рабочий процесс обработки.

RockSL нацелена на создание интегрированного общего набора данных с использованием операционного программного обеспечения с открытым доступом. Мы разработали рабочую процедуру от сбора данных до спектрального применения (рис. 8), слегка скорректировав ее по сравнению с предыдущим исследованием, чтобы повысить ее эффективность и надежность.

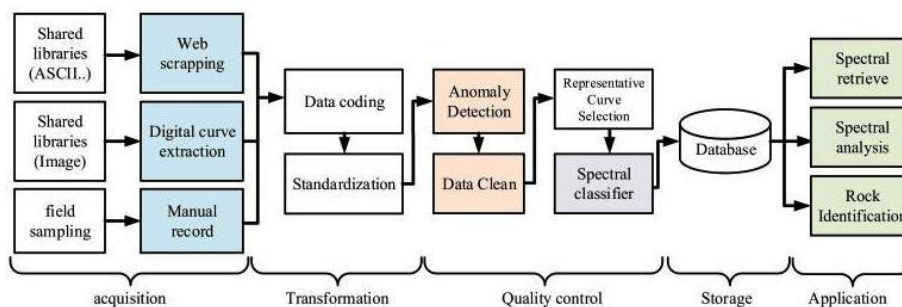


Рис. 8. Рабочий процесс исследования RockSL.

Организация и управление данными являются важнейшими видами деятельности, включая сбор, классификацию, кодирование и очистку данных.

Сбор данных.

Интегрированные исходные данные включают общие данные, загруженные из общих библиотек, и данные образцов, измеренных в лаборатории. В общих форматах данных обычно используются ASCII или текстовые файлы, которые можно импортировать непосредственно в RockSL. Однако некоторые спектры, хранящиеся в общих спектральных библиотеках (например, Mineral Infrared Spectral Atlas), представлены в форматах изображений, которые неудобны в использовании.

Разработан функциональный модуль, использующий алгоритмы прореживания для извлечения цифровых спектральных кривых из изображений. Алгоритм утончения используется для извлечения пикселя скелета для толстой линейной цели, в то время как алгоритм без утончения фокусируется на границе кривой, а не на линии скелета. Количественно оценили эффект двух алгоритмов векторизации с индексами R2, RMSE и MAE. В R2 доказано, что значения двух алгоритмов близки к 1,0, а значение, представленное каждым пикселем на вертикальной оси (спектральная отражательная способность) равно 0,000375. Проверки показывают, что разрешение извлеченных цифровых спектральных кривых достигает 2 нм, а точность спектрального поглощения достигает уровня пикселей (применительно к экрану ПК).

Преобразование данных.

После сбора данных собранная информация должна быть преобразована и стандартизирована. В соответствии со способом кодирования горных пород на основе химического состава и кристаллической структуры минералов/горных пород спектральные кривые образцов сопоставляются с ожидаемым полем спектра. Чтобы стандартизировать формат хранения данных для удобства использования, операция преобразования в основном объединяет спектральные измерения (т. е. излучательную и отражательную способность) и единицы измерения длины волны (т.е. микрон, нанометр и волновое число). Различные спектральные данные стандартизированы в соответствии со спектральными кривыми отражения с нанометровым спектральным разрешением.

Контроль качества.

Спектральные данные, загруженные из общих баз данных, цифровые координаты, извлеченные из изображенных кривых, и спектры выборки, измеренные инфракрасным спектрометром с преобразованием Фурье (FTIR) в лаборатории, проверены, чтобы гарантировать качество данных. Меры контроля качества были разработаны для одиночных и множественных спектральных кривых. Во-первых, максимальный и минимальный пороги отражения в спектральных данных устанавливаются равными 1,0 и 0 соответственно, а данные за пределами диапазона считаются аномальными. Во-вторых, коэффициент вариации (CV) равен стандартному отклонению, деленному на среднее значение коэффициента отражения и его значение может представлять степень относительного изменения коэффициента отражения и служить основой для проверки качества данных одной спектральной кривой. В-третьих, алгоритм boxplot, который в основном использует статистику (например, медиану и квартиль), может быть использован для изучения распределения набора данных и ошибок в нем.

Учитывая, что повторные измерения одного и того же образца одним и тем же прибором могут привести к получению множества похожих данных, необходимо определить показатель точности для проверки качества каждой спектральной кривой. Точность внутреннего соответствия и смещение положения длины волны основного пика поглощения используются в качестве индикаторов для проверки того, являются ли они неквалифицированными или нет. Средняя кривая отражательной способности вычисляется из серии кривых при повторных наблюдениях, а затем внутреннее соответствие кривой отражательной способности для каждого повторного наблюдения вычисляется следующим образом:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2)}{m \times n}}, \quad (1)$$

$$\delta_{ij} = F_{ij} - F_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m),$$

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}}{m}, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

где ε является ли индекс стабильности данных показателем согласованности спектров, полученных в результате повторных измерений, F_i является средней отражательной способностью в соответствующей точке множества аналогичных спектров, F_{ij} является наблюдаемой отражательной способностью в соответствующей точке спектра, m - количество повторных наблюдений, и n это количество точек кривой, участвующих в вычислении.

Исходные данные могут иметь идентичные спектральные данные для каждой породы/минерала из-за перекрытия некоторых общих библиотек. Согласованность и сходство спектральных кривых определялись несколькими коэффициентами корреляции (например, коэффициентом корреляции Пирсона и угловым косинусом), чтобы избежать повторного импорта данных. Идентичные спектральные кривые (т.е. с коэффициентом корреляции, приближающимся к 1,0) были удалены, и были сохранены слегка отличающиеся данные (т.е. с коэффициентом корреляции ниже 0,99), которые могут подразумевать информацию о составе. Кроме того, репрезентативная кривая была выбрана из очень похожих спектров и помечена, чтобы избежать повторного сопоставления и повысить эффективность службы сопоставления. Аналогичные спектры, подлежащие обработке, должны быть получены при тех же условиях измерения, а коэффициент корреляции нескольких кривых должен превышать 0,95. Два основных метода вычисления подобия спектров описаны ниже.

(1) Спектральный коэффициент корреляции. Этот коэффициент используется для подгонки двух кривых отражения на основе принципа наименьших квадратов. Формула коэффициента корреляции выглядит следующим образом:

$$f = \frac{\text{Cov}(P, \rho)}{\sqrt{D(P)}\sqrt{D(\rho)}} = \frac{\text{Cov}(P, \rho)}{\sigma(P)\sigma(\rho)}, \quad (4)$$

где f является коэффициентом корреляции между эталонным спектром P и целевой спектр ρ , $\text{Cov}(P, \rho)$ является ковариацией эталонного и согласованного целевых спектров, $D(P)$ является эталонной спектральной дисперсией, и $D(\rho)$ является согласованной целевой спектральной дисперсией.

(2) Угловой косинус. Значение представляет собой обобщенный включенный угол двух целевых кривых в n -мерном пространстве. Формула углового косинуса выглядит следующим образом:

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\sum_{\alpha=1}^n x_{i\alpha} x_{j\alpha}}{\sqrt{\sum_{\alpha=1}^n x_{i\alpha}^2 * \sum_{\alpha=1}^n x_{j\alpha}^2}} \quad (0 \leq \cos \theta_{ij} \leq 1), \quad (5)$$

где $x_{i\alpha}$ является ли отражательная способность образца α th точка i -й кривой, $x_{j\alpha}$ является ли отражательная способность образца α th точка j -й кривой, и n - количество точек выборки на спектральной кривой.

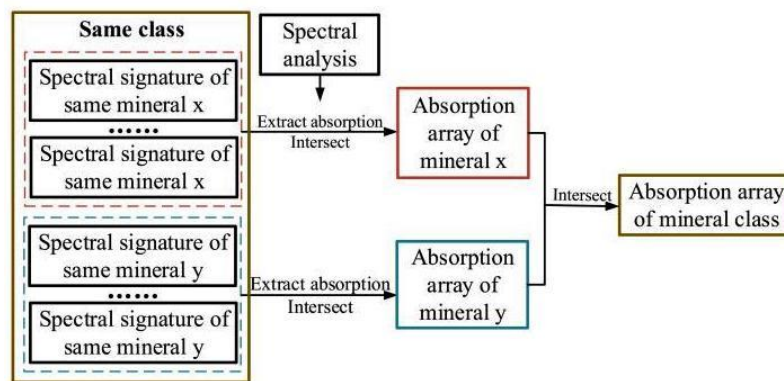


Рис. 9. Диаграмма процесса пользовательского спектрального классификатора.

Пользовательский спектральный классификатор (рис. 9) был разработан на основе характеристик данных, чтобы ограничить диапазон сопоставления, когда неизвестные спектры без каких-либо параметров сопоставляются с эталонными спектрами. Положение поглощения в спектре отражает минеральный состав, который может быть использован для различения категорий минералов и создания дерева классификационных характеристик. Индивидуальный метод классификатора повторно выбирает спектральные данные, вычисляет положение поглощения каждой кривой, а затем пересекается с собственными значениями нескольких кривых одного и того же минерала для определения общих характеристик. Впоследствии положения поглощения различных минералов из одного и того же подкласса или класса минералов пересекались для определения новых подклассов и классов. На основе пользовательского классификатора в RockSL было создано многофакторное дерево, содержащее позиции поглощения каждого минерала, подкласса и класса.

Спектральное извлечение, анализ и сопоставление.

Предварительное использование спектрального поиска, анализа и сопоставления было достигнуто и встроено в операционную систему RockSL (локальная настольная программа в оконной системе). Запрошенные данные можно быстро найти и отобразить, введя

название породы/минерала (на английском или китайском языках), предоставляя пользователям качественный способ предварительного определения категории породы/минерала.

Как упоминалось выше, положение поглощения и информация о форме волны (например, глубина и ширина поглощения) спектральных данных являются показателями определения категории и содержания минерального состава. Следовательно, был разработан модуль спектрального анализа для выполнения предварительной обработки (т.е. спектральной производной и непрерывного удаления спектра), выделяя характеристики спектральных кривых. Реализация алгоритма выпуклой оболочки показано на рисунке 11. Однако особенности поглощения в широкой вогнутой области трудно различимы, которые будут рассмотрены и внедрены в систему для высвобождения. Кроме того, модуль спектрального анализа вычисляет несколько параметров формы волны поглощения спектральной кривой (например, положение поглощения, ширина поглощения, высота поглощения, площадь поглощения, число пиков поглощения, симметрия поглощения, наклон спектра и индекс спектрального поглощения), обеспечивая определенную поддержку для последующего создания базы спектральных знаний.

Технология спектрального сопоставления, основанная на спектральной библиотеке, представляет собой в основном количественный метод идентификации спектра неизвестного объекта путем сравнения с эталонными спектрами. В соответствии с анализом сходства могут быть определены типы целевого объекта. Различные часто используемые алгоритмы сопоставления (например, binary coding mapper (BCM), spectral angle mapper (SAM), spectral information divergence (SID), SID_SA и подгонка спектральных коэффициентов (SCF)) реализованы в операционной системе RockSL.

BCM заранее присваивает точкам на спектральной кривой значения 0 или 1,0 с учетом порога спектрального отражения/ излучения (среднее значение для всего спектра), что значительно повышает эффективность распознавания совпадений. После преобразования эталонного и целевого спектров в двоичные массивы вычисляется совпадающее сходство двух массивов. SAM рассматривает спектральную кривую как вектор в многомерном пространстве и использует угол между целевым и эталонным спектрами для представления их совпадающего сходства, полагаясь на форму всей спектральной кривой и игнорируя различия между локальными особенностями. Расчет показан в формуле (5). Метод отображения SID направлен на вычисление SID с точки зрения теории информации. SID_SA сочетает в себе SID и согласование спектральных углов (SA). Коэффициент корреляции двух спектральных кривых также может быть рассчитан с помощью SCF как показано в формуле (4). Предлагается пользовательский метод сопоставления, который

объединяет показатели сходства вышеуказанных методов и принимает их среднее значение для оценки эффекта сопоставления. Механизм сопоставления операционной системы показан на рисунке 10. Чтобы повысить эффективность согласования, существующая информация о неизвестном спектре используется для ограничения диапазона согласования. Целевой спектр без соответствующей информации предварительно классифицируется с помощью специального классификатора, описанного выше. Учитывая, что RockSL сохраняет исходную информацию общих данных (т.е. спектральное разрешение), система автоматически выполняет повторную выборку спектра в соответствии с информацией о целевом спектре. Доля соответствующего диапазона длин волн ко всему диапазону целевого спектра в качестве взвешенного индекса, умножается на совпадающее сходство для получения индекса достоверности совпадения. Наконец, отображаются эталонные спектры, подлежащие сопоставлению (с достоверностью сопоставления, упорядоченной от наибольшего к наименьшему), и соответствующие метаданные.

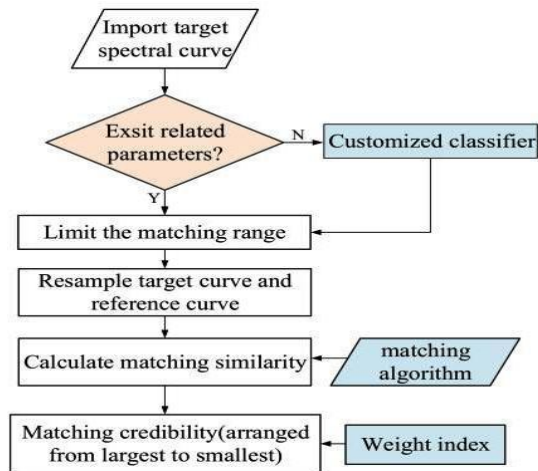


Рис. 10. Механизм работы спектрального согласования.

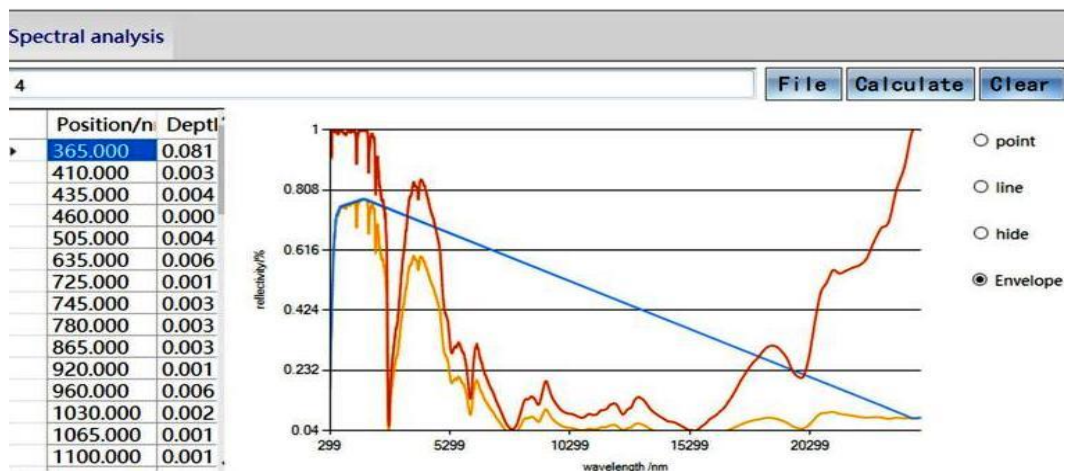


Рис. 11. Анализ данных RockSL. Целевая кривая отображается желтым цветом, огибающая спектра — синим цветом, а спектры с удаленным континуумом (CR) — выпуклыми. алгоритм корпуса показан оранжевым цветом.

Разработка платформы.

SQL Server и платформа Visual Studio используются для построения RockSL и операционной системы соответственно. Основные функции операционной системы показаны ниже.

Интерфейс спектрального анализа (рис. 12) предназначен для вычисления параметров формы волны поглощения, обозначения положения кривой поглощения в виде точек и линий, вычисления огибающей соответствующей кривой и отображения спектральной кривой после удаления огибающей. Удаление огибающей (известное как удаление континуума) может эффективно усилить характеристики долины поглощения спектра. Значение коэффициента отражения всей полосы нормализуется и поддерживается в диапазоне от 0 до 1 после удаления огибающей, что способствует анализу и сравнению характеристик поглощения. Интерфейс поиска данных (Рис. 12) обеспечивает качественный способ отображения целевого минерала или породы со спектральной и атрибутивной информацией.

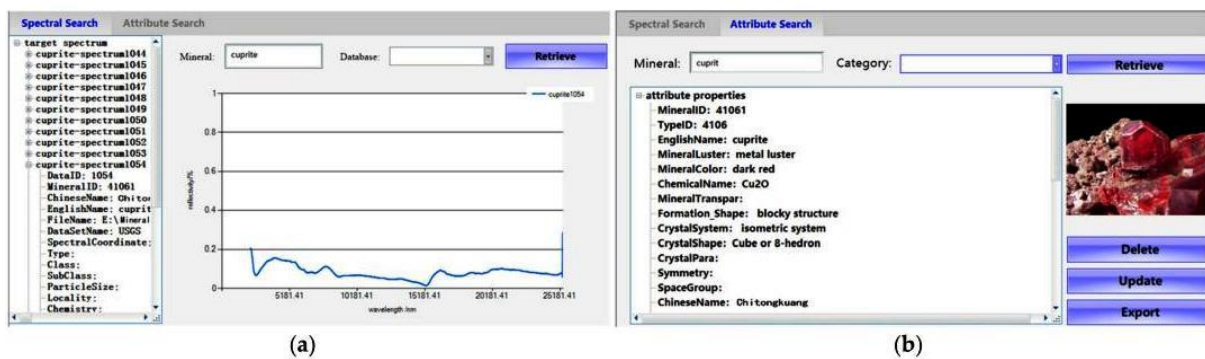


Рис. 12. Извлечение полезных ископаемых из операционной системы (пример поиска: куприт). (а) Поисковый интерфейс спектральной информации; (б) интерфейс поиска атрибута минерала показывает атрибут информация и изображение минерала (куприт, скачанный с открытого сайта).

Интерфейс сопоставления спектров является важной частью RockSL, помогая пользователям быстро сопоставлять неизвестные спектры. Пользователь может нажать кнопку "Открыть файл", чтобы импортировать измеренную спектральную кривую минерала (выбрать, удалять огибающую или нет), а затем выбрать соответствующие параметры и параметры предварительной обработки. Впоследствии соответствующий коэффициент корреляции (соответствующая достоверность) может быть получен от наибольшего к наименьшему.

Экспериментальная валидация.

Используя RockSL, сделано предварительное приложение, сопоставив и проанализировав измеренные спектральные данные образца породы, протестированного с помощью идентификации среза породы. Образец породы был собран в Хэньяне, провинция Хунань, Китай.

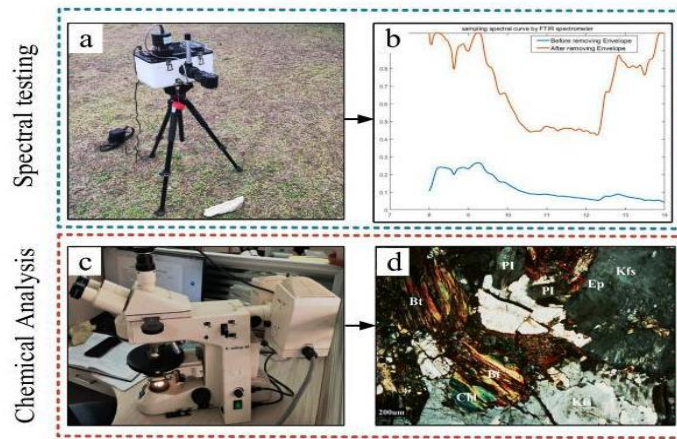


Рис. 13. Экспериментальный образец и операция анализа. а – ИК-фурье-спектрометр 102F для спектрального контроля, б – спектральные данные (8–14 мкм), измеренные спектрометром, и кривая после снятия оболочки, в – микроскоп Axioskop40, г – результат идентификации указывает на минеральная составляющая плагиоклаза (Pl), калиевого полевого шпата (Kfs), биотита (Bt), хлорита (Chl) и эпидота (Ep).

Спектральные данные (рис. 13b) образца породы, измеренные ИК-спектрометром (рис. 13a), сравнивались с эталонными спектрами в RockSL для определения категории породы и минерального состава. Идентификация среза образца (рис. 13d), наблюдаемая с помощью микроскопа Axioskop40 (рис. 13c) использовался в качестве эталона для проверки результатов спектрального сопоставления на основе RockSL. Согласно анализу идентификации среза породы, мы установили минералогические компоненты образца породы: 55% плагиоклаза, 30% К-полевого шпата, 15% биотита и некоторые вторичные минералы (хлорит и эпидот).

ИК-спектрометр.

В этом исследовании портативный инфракрасный спектрометр 102F разработанный и изготовленный компанией D & P Instrument company в США, был использован для многократного измерения неизвестного образца породы в безоблачной наружной среде, в результате чего была получена кривая спектральной излучательной способности (тепловая информация). Детекторы, установленные на 102F FTIR, представляют собой двухцветные фотоэлектрические элементы из теллурида кадмия ртути (MCT) и антимонида индия (InSb) и способны одновременно собирать данные во всем диапазоне длин волн 3-14 мкм. Детектор HgCdTe, работающий при криогенном охлаждении жидким азотом 77 К, позволяет получать высококачественные наблюдения отражательной способности в спектральных диапазонах 8-14 мкм.

Спектрометр использовался для вертикального наблюдения образца породы на расстоянии приблизительно 1,0 м в безоблачных условиях при температуре воздуха приблизительно 300,15К. В ходе эксперимента каждый образец был измерен трижды. Прибор был настроен на 10 повторных выборок каждого измерения, а затем средняя кривая была принята за измеренный спектр.

Экспериментальный анализ.

Учитывая атмосферное пропускание, обычно получаем спектроскопическую информацию в атмосферных окнах (т.е. в среднем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах) для идентификации наземных объектов. Выбрана тепловая инфракрасная полоса (8-14 мкм) для спектрального измерения и согласования. Различные методы сопоставления, поддерживаемые RockSL, были использованы для сравнения спектра образца с эталонным спектром для получения точности сопоставления и анализа его минеральных компонентов. Два параметра, а именно, тип породы и минерала, используются в качестве ограничивающих условий для определения соответственно конкретного типа породы и минерального состава, который может содержаться в образце породы.

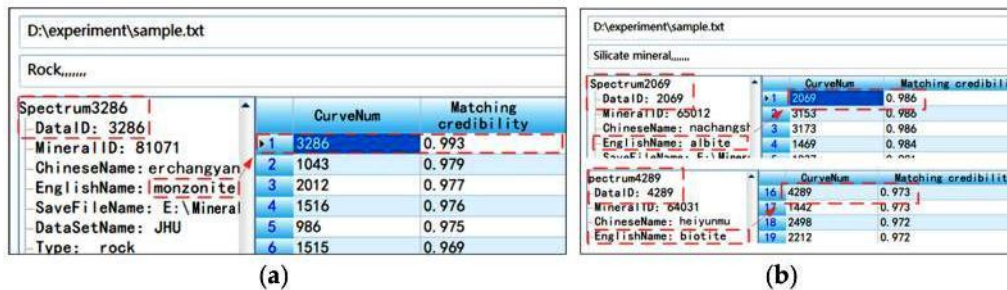


Рис. 14. Идентификация неизвестной породы и ее состава с помощью RockSL. (а) Спектральная кривая монзонита (№ 3286) хорошо совпала со спектрами образца. (б) Минеральные кривые альбита (№ 2069) и биотита (№ 4289) хорошо согласуются со спектрами образца.

Как показано на рисунке 14а, сначала использовали алгоритм SID_SA для сопоставления спектральных данных категорий горных пород в RockSL и, наконец, нашли спектр монзонита с достоверностью соответствия приблизительно 0,993. Достоверность сопоставления эталонного спектра монзонита и неизвестного спектра, рассчитанного различными методами, получила наивысшее значение. Мы пришли к выводу, что образец породы представляет собой монзонит, который может состоять из силикатных минералов, включая плагиоклаз, щелочной полевой шпат, пироксен, амфибол, слюду и другие минералы. Эталонный спектр монзонита в RockSL был собран из библиотеки JHU, включая петрографическое описание и химический анализ конкретного минерального состава (т.е. 70% полевого шпата, 18% кварца, 8,2% пироксена, и 1,2% биотита). Затем в диапазоне силикатных минералов был установлен соответствующий модуль для соответствующего анализа его минерального состава. Кроме того, кривые минералов альбита и биотита, собранные из библиотеки USGS, также получили высокие оценки достоверности сопоставления 0,986 и 0,973, соответственно, с помощью алгоритма SID_SA (рис. 14б). Эти спектральные кривые согласуются с особенностями целевого спектра в разных интервалах и согласуются с минеральным составом спектра монзонита. Чтобы

сделать очевидным результат сопоставления кривых, несколько спектральных кривых минералов визуализируются вместе для детального сравнения и познания (рис. 15).

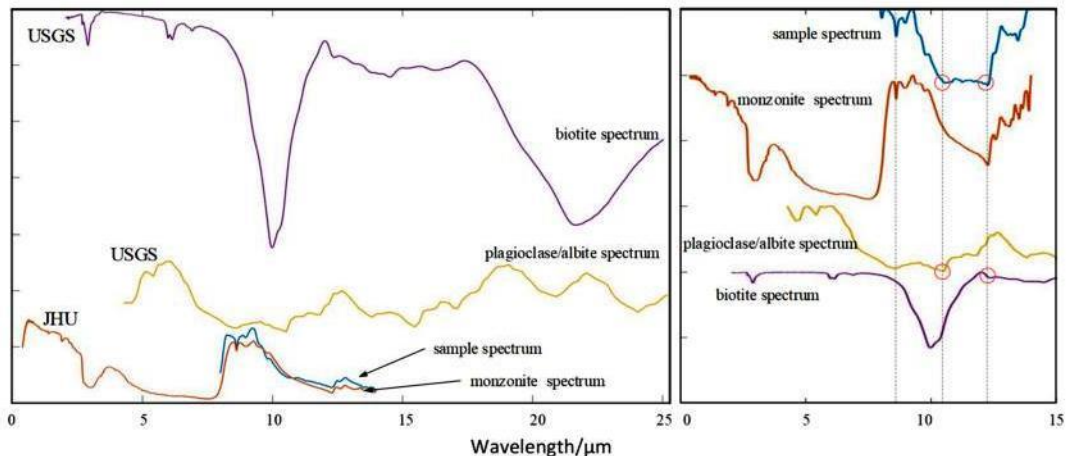


Рис. 15. Идентификация образца неизвестной породы и его состава с помощью RockSL. Сравнение спектра образца и эталонного спектра, в котором спектр монзонита и спектр образца примерно совпадают (слева). Спектр образца и контрольные спектры после удаления оболочки для выделения характеристик поглощения, и положения пиков поглощения перекрываются (справа).

Используя RockSL, получили тип образца породы, то есть монзонит, и его минеральный состав из полевого шпата и биотита. Эти результаты в основном согласуются с результатами испытания срезов горных пород. Образец кварца также был протестирован с использованием ИК-спектрометра и сравнен с эталонными спектрами в RockSL. Результат указывает на то, что целевой спектр имеет высокое совпадающее сходство с эталонными спектрами (quartz) из разных библиотек (т.е. спектральных библиотек ASU и PDS) с различными параметрами измерения. Эталонные спектры сопоставления взяты из нескольких спектральных библиотек, что еще раз доказывает, что использование RockSL является быстрым и эффективным методом идентификации неизвестных пород и минералов.

Обсуждение и выводы.

Массивные спектральные данные, хранящиеся в разных библиотеках, имеют разные форматы хранения и спектральные разрешения, а также несовместимые категории минералов и параметры измерений, что приводит к низкой полезности данных. Не существует интегрированной платформы обмена данными, учитывающей разнообразие спектральных библиотек горных пород и минералов в глобальном масштабе. Эти ограничения могут быть преодолены путем интеграции спектральных данных по всему миру для обеспечения легкого обмена и предоставления услуг по сопоставлению для идентификации минерального состава. Спектральные данные из библиотек USGS, JHU, JPL, PDS и ASU и Инфракрасного спектрального атласа минералов были собраны и интегрированы в открытую базу данных с различными диапазонами отбора проб и категориями минералов, сохраняя квалифицированные данные для создания надежного и

всеобъемлющего открытого спектрального набора данных (т. е. RockSL). Кроме того, для RockSL было разработано программное обеспечение для управления базами данных для управления разнообразными данными, включая спектральные кривые, информацию об измерениях и исходные файлы. Измеренный спектр можно сравнить с существующими эталонными спектрами в RockSL с помощью разработанного программного обеспечения, тем самым получая соответствующее сходство и определяя тип образца и минеральный состав неизвестного образца породы / минерала.

Представлена общая информация о RockSL и несколько ключевых методов сбора данных (например, векторизация кривой), контроль качества и спектральное применение. RockSL обеспечивает не только новую схему организации спектральных данных, но и простое решение для пользователей по созданию тематических спектральных библиотек для конкретных приложений. Пример демонстрирует, что RockSL можно использовать для идентификации неизвестных пород и быстрого и точного анализа их состава.

Учитывая широту и сложность спектрального анализа данных и их применения, многие глубоко укоренившиеся проблемы требуют дальнейшего изучения. Во-первых, RockSL следует расширить за счет включения спектральных библиотек, разработанных другими учреждениями или организациями. Во-вторых, спектральную библиотеку следует расширить до полноволнового диапазона, чтобы охватить ближнюю и дальнюю инфракрасную области и добавить данные со спектральным разрешением повышенной точности. Также необходимо создать коллекцию разномасштабных (например, с разрешением спектра) спектральных данных о минералах, чтобы заложить основу для извлечения знаний и дальнейших исследований. В-третьих, объединить знания спектроскопии, минералогии и геофизики, чтобы обобщить спектральные характеристики минерального состава, уточнить влияние параметров измерений на спектральные кривые и создать надежную базу знаний. Современные тенденции развития спектральных библиотек включают не только накопление спектральных данных, но и использование методов интеллектуального анализа данных и глубокого анализа для разработки надежной базы спектральных знаний для обеспечения улучшенной поддержки будущих приложений ДДЗ.

3. Обработка ДДЗ

Комбинация диапазонов - это простейший тип метода цифровой обработки изображений. Выбор наилучшей комбинации диапазонов из "n" возможных комбинаций диапазонов для спутниковых данных зависит от приложения и интересующих функций. В большинстве случаев лучший цветовой композит для разведки полезных ископаемых оказывается с одним из диапазонов SWIR или Mid Infra Red (MIR). Различные уровни контраста, такие как линейный, корневой, выравнивание гистограммы и т. д., помогают выявить различные элементы изображения, что улучшает интерпретируемость.

Фильтрация - это операция соседства, при которой каждый пиксель на изображении сравнивается с окружающими пикселями в окне ядра фильтра, и выходные данные вычисляются для выявления границ, указывающих на литологические контакты и линейные геологические структуры. Направленные фильтры помогают выявить структурные особенности в определенном направлении. Точно так же в частотной области повышаются более высокие частоты, связанные с краями, чтобы идентифицировать структурные детали и геологические аномалии.

Анализ главных компонент (PCA) - это метод сжатия данных, при котором дисперсия между спектральными полосами сжимается до нескольких компонент. Он выбирает некоррелированные линейные комбинации (нагрузки на собственные векторы) переменных таким образом, что каждая последовательно отслеживаемая линейная комбинация или главный компонент имеет меньшую дисперсию. Выходные данные PCA - это каналы с максимальной дисперсией в первых нескольких полосах, тогда как остальные содержат шум. Первые одна или две полосы в выходном сигнале PCA в различных комбинациях с исходными полосами демонстрируют различие между вариациями лимитных единиц и формами рельефа. ДДЗ преобразуются в новые компоненты, которые являются наименее взаимозависимыми. В этом смысле спектральные данные сжимаются в новую систему координат, избыточные данные удаляются, и, наконец, создаются новые компоненты с информацией из всех спектральных диапазонов, которые используются вместо исходных данных. Таблица 6 показывает статистические результаты, полученные в результате анализа PCA.

Табл. 6. Статистические результаты, полученные в результате анализа основных компонент.

PCs	1st Band	2nd Band	3rd Band	4th Band	5th Band	6th Band	7th Band	8th Band	9th Band	Eigenvalue (%)
PC1	0.331	0.334	0.335	0.332	0.33	0.338	0.339	0.333	0.337	91.6
PC2	0.321	0.26	0.264	0.215	0.195	0.143	-0.457	-0.472	-0.470	5.6
PC3	-0.764	-0.036	0.104	0.059	-0.251	0.563	0.02	0.129	0.031	1.1
PC4	0.108	-0.415	0.492	0.61	0.283	-0.348	0.015	-0.672	0.205	0.94
PC5	-0.170	-0.305	0.265	0.519	-0.283	-0.101	0.119	0.04	0.319	0.42
PC6	0.024	-0.541	0.064	-0.162	0.23	0.159	-0.205	-0.224	-0.407	0.19
PC7	0.268	0.027	0.162	0.641	-0.381	0.101	-0.219	-0.047	0.013	0.09
PC8	-0.041	-0.261	0.207	0.3	0.06	-0.291	0.262	-0.670	0.435	0.04
PC9	0.292	-0.026	-0.076	-0.163	0.258	0.317	0.152	-0.320	0.168	0.02

Преобразование PCA используется для уменьшения степени корреляции между полосами данных и максимизации различий между полосами. На большинстве изображений информативность соседних диапазонов длин волн практически одинакова (высокая корреляция). PCA является эффективным методом спектрального улучшения и обработки информации. PCA основан на линейных алгебраических матричных операциях и многомерной статистике. PCA может эффективно концентрировать максимальную информацию о многих коррелированных спектральных диапазонах изображения в нескольких некоррелированных основных компонентах и, следовательно, может уменьшить размер набора данных и обеспечить эффективное RGB-изображение и его характеристики. Это связано со статистическими методами выбора полос, целью которых является выбор оптимальных триплетов полос с минимальной межполосной корреляцией и максимальным информационным содержанием. Первая полоса PCA содержит самый большой процент дисперсии данных, а вторая полоса PCA содержит вторую по величине дисперсию данных и так далее; последние полосы PCA кажутся зашумленными, потому что они содержат очень небольшую дисперсию, большая часть которой обусловлена шумом в исходных спектральных данных. Полосы PCA дают более красочные цветные составные изображения, чем спектральные цветные составные изображения, поскольку данные некоррелированы. PCA применяется к объединенному изображению. Полученное изображение имеет высокое пространственное разрешение и широкий диапазон цветов, что позволяет легко различать различные литологические единицы.

Полезной является соотношение полос изображений, которое представляет собой деление цифрового номера пикселя в одном диапазоне на номер пикселя в другом диапазоне. Соотношения различных полос полезны для выделения различных элементов изображения. Например, соотношение двух диапазонов среднего инфракрасного (MIR) диапазона (диапазон 5 и диапазон 7 LANDSAT TM) может выявить зоны гидротермальных изменений; соотношение полосы ближнего инфракрасного (NIR) и красного диапазона может выявить аномалии растительности.

Объединение данных - еще один важный метод, с помощью которого также можно объединить данные от различных типов датчиков. Это делается для получения новой информации, пространственной или спектральной, доступной в обоих этих наборах данных. Например, можно комбинировать изображения SAR с мультиспектральными изображениями или панхроматическое изображение с высоким разрешением с мультиспектральным изображением среднего разрешения для получения мультиспектрального изображения с высоким разрешением. Например, объединение

данных IRS-PAN с высоким разрешением и данных IRS LISS-III среднего разрешения приводит к получению изображения с высоким разрешением с мультиспектральной информацией.

Буферный анализ используется для определения области влияния рудоперспективных характеристик. Иерархический весовой индекс разработан на основе влияния различных параметров, контролирующих процесс минерализации. Все пространственные слои объединяются с использованием анализа покрытия, доступных в ГИС, для создания единого покрытия. Общий вес, полученный для каждого многоугольника в комбинированном слое, указывает на общую рудоперспективность в конкретном месте. Кроме того, полученный общий вес может быть разделен на разные классы для определения приоритетов потенциальных блоков.

Методы классификации изображений можно разделить на два типа: контролируемые и неконтролируемые. В контролируемых классификаторах в качестве обучающих выборок используются пиксели изображения, представляющие области известных функций. Неконтролируемые классификаторы идентифицируют группы пикселей, которые демонстрируют аналогичный спектральный отклик. Самоорганизующиеся карты (SOM) в качестве неконтролируемого классификатора и машина опорных векторов (SVM) в качестве контролируемого классификатора выбираются для выделения литологических и структурных единиц из изображений Sentinel-2.

Самоорганизующаяся карта (SOM) - это метод векторного квантования, который размещает векторы-прототипы на регулярной низкоразмерной сетке в упорядоченном виде. SOM состоит из «нейронов», организованных в низкоразмерную сетку. Каждый нейрон представляет собой d -мерный весовой вектор, где d равно размерности входных векторов. Нейроны связаны с соседними нейронами отношением соседства, которое определяет топологию или структуру карты.

Обработка SOM преобразует нормализованные входные данные в другой меньший набор данных. Это преобразование, называемое «наилучшим соответствием» (BMU), имеет такое же количество типов данных (ту же размерность), что и входные данные. Нормализация данных выполняется путем вычитания среднего и последующего деления со стандартным отклонением данных. BMU в SOM представляет собой двумерную карту - пространство SOM. Каждому из входных данных соответствует BMU. Входные данные могут быть связаны с одним и тем же BMU, и в этом случае SOM можно рассматривать как сокращение входных данных. U -матрица (рис. 16) описывает отклонение конкретной ячейки от соседних с использованием среднего «расстояния» между BMU.

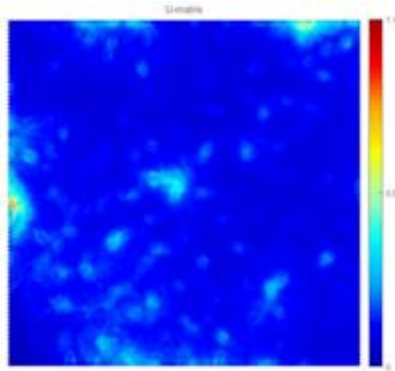


Рис. 16. Пример U-матрицы в SOM.

Радиометрическая коррекция делается для уменьшения или исправления ошибок в цифровых номерах изображений. Этот процесс улучшает интерпретируемость и качество ДДЗ. Радиометрическая калибровка и коррекция особенно важны при сравнении наборов данных за несколько периодов времени. Энергия, регистрируемая датчиками на борту самолетов или спутников, может отличаться от фактической энергии, излучаемой или отражаемой от поверхности земли. Это связано с азимутом и высотой солнца, а также атмосферными условиями, которые могут влиять на наблюдаемую энергию. Следовательно, чтобы получить реальную освещенность или отражательную способность, необходимо скорректировать радиометрические ошибки. Значение, регистрируемое для данного пикселя, включает не только отраженное или испущенное излучение от поверхности, но также излучение, рассеянное и испущенное атмосферой. В большинстве случаев интересует фактические значения поверхности. Для достижения этих значений необходимо применять радиометрическую калибровку и коррекцию.

Калиброванный Датчик записывает интенсивность электромагнитного излучения для каждого пикселя в виде цифрового числа (DN). Эти цифровые числа могут быть преобразованы в более значимые единицы реального мира, такие как яркость, отражательная способность или яркостная температура. Для выполнения этой калибровки необходима конкретная информация датчика. Большинство пакетов программного обеспечения для обработки изображений имеют инструменты радиометрической калибровки. Радиометрическая калибровка на Envi показана на рис. 17.

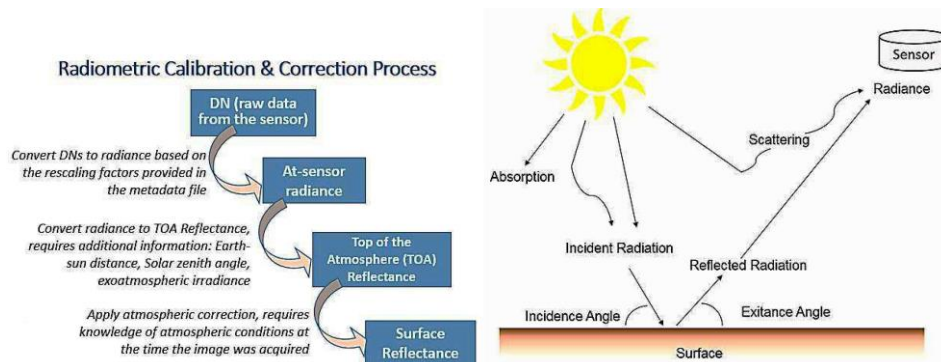


Рис. 17 Радиометрическая корректировка данных Landsat-8 OLI

Атмосферная коррекция — это процесс устранения влияния атмосферы для получения значений коэффициента отражения поверхности. Атмосферная коррекция может значительно улучшить интерпретируемость. В идеале этот процесс требует знания атмосферных условий и свойств аэрозоля на момент получения изображения. Данные корректируются модулем Flaash в Envi.

Подмножество изображения, которое включает только интересующие нас области. Это экономит место на диске и время обработки (рис. 18). Некоторые программные пакеты называют этот процесс подмножеством, в то время как другие используют термин отсечение. Большинство растровых данных можно разделить на подмножества, используя координаты XY, векторные файлы или созданные пользователем области интереса (ROI). Этот процесс всегда создает новый набор данных, который содержит только ваше подмножество данных.

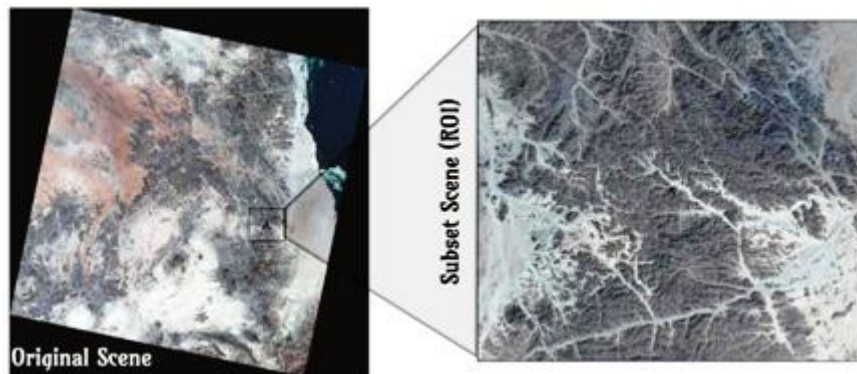


Рис. 18 Размер файла исходного изображения (слева) составляет приблизительно 1,52 Гб, а подмножества (справа) — всего 20 Мб.

Преобразование минимальной доли шума (MNF) используется, чтобы показать изменение между полосами в изображении. Это статистический метод определяет различия в изображении на основе DN пикселей в различных диапазонах. MNF определяет присущую размерность данных изображения, чтобы отделить шум в данных и уменьшить вычислительные требования для последующей обработки. Этот шаг часто выполняется в качестве предшественника других типов анализа. Преобразование MNF по существу представляет собой преобразование двух основных компонентов. Первое преобразование, основанное на оценочной ковариационной матрице шума, декоррелирует и масштабирует шум в данных. Этот первый шаг приводит к преобразованным данным, в которых шум имеет единичную дисперсию и не имеет корреляции между полосами. Второй шаг представляет собой стандартное преобразование главных компонент, которое создает несколько новых полос, содержащих большую часть информации. Используя только когерентные части, шум отделяется от данных, тем самым улучшая спектральные характеристики. После применения метода MNF на 7-канальных изображениях ТМ (после калибровки в режиме отражения) мы получим результат - 7 новых полосовых изображений

MNF. Пиксели изображения представлены собственными значениями. При изучении собственных значений видно, что первые полосы MNF (1 и 2) имеют самые высокие значения, а остальные полосы имеют стабильно низкие значения. Именно первые две полосы с большими значениями содержат большую часть информации и именно эти полосы соответствуют изображениям MNF. Остальные полосы низких значений (например, 3 и ниже) рассматриваются как шум.

Использование данных с высокими собственными значениями приводит к отделению шума от данных и улучшает спектральные результаты. Таблица 7 показывает статистические результаты, полученные в результате анализа MNF.

Табл. 7. Статистические результаты, полученные при преобразовании MNF.

MNF Band	Eigenvalue	Variance (%)
1	82.3	81.7
2	8.54	8.48
3	5.41	5.37
4	1.66	1.65
5	1.51	1.5
6	1.31	1.3

На собственных изображениях со значениями менее 2 обычно преобладает шум, и их следует исключить при обратном преобразовании MNF, чтобы получить полосы поверхностного отражения с наименьшим шумом (рис. 19).

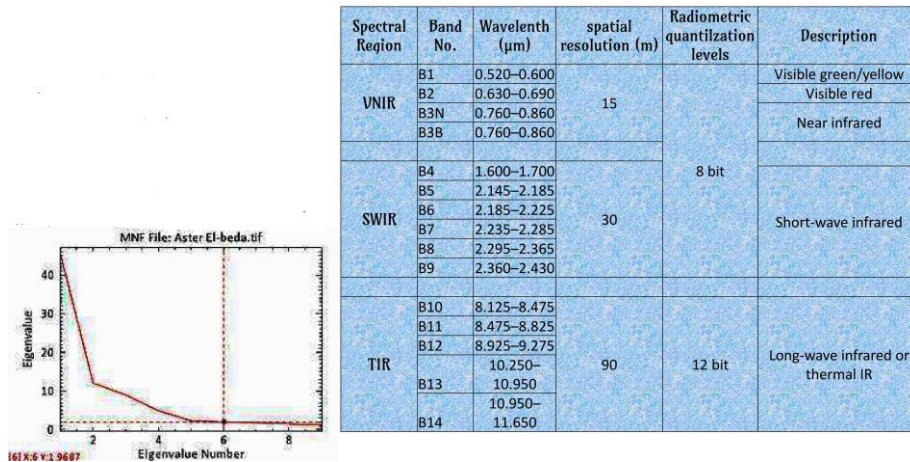


Рис. 19 Устранение шума

Изображения показывают информацию, сжатую только в несколько полос. Избыточность данных устраняется как шум. В результате получаются более интерпретируемые изображения. Данные упрощаются или уменьшается размерность (рис. 20).

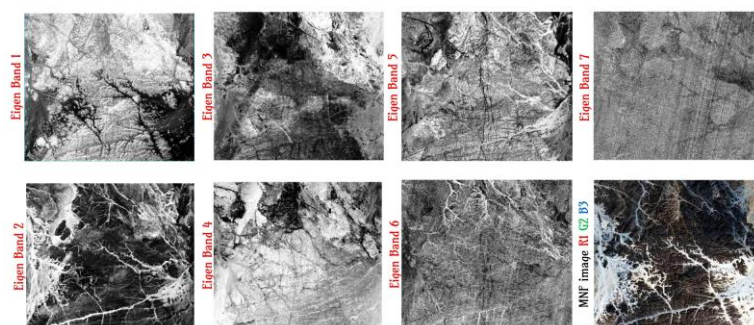


Рис. 20 Изображения собственных значений

Коэффициент оптимального индекса (OIF) — это статистическое значение, которое можно использовать для выбора оптимальной комбинации трех каналов спутникового изображения, с помощью которой вы хотите создать цветовую композицию. Оптимальное сочетание полос из всех возможных 3-х Комбинация полос - это комбинация с наибольшим количеством «информации» (= самая высокая сумма стандартных отклонений) с наименьшим количеством дублирования (самая низкая корреляция между парами полос). Ограничение вычисления OIF заключается в том, что наилучшая комбинация для передачи общей информации может не быть наилучшей комбинацией для передачи конкретной информации, необходимой для анализа изображения. Метод OIF используется для ранжирования всех возможных трехполосных комбинаций по эффективности для геологического картирования конкретного участка. На основании результатов, полученных от OIF, комбинация 7, 2 и 1 показывает наивысшее значение OIF с первым рангом. Эта комбинация полос содержит больше всего информации с наименьшим количеством дублирований, поэтому границы между породами и другими геологическими особенностями очень четкие (рис. 21).

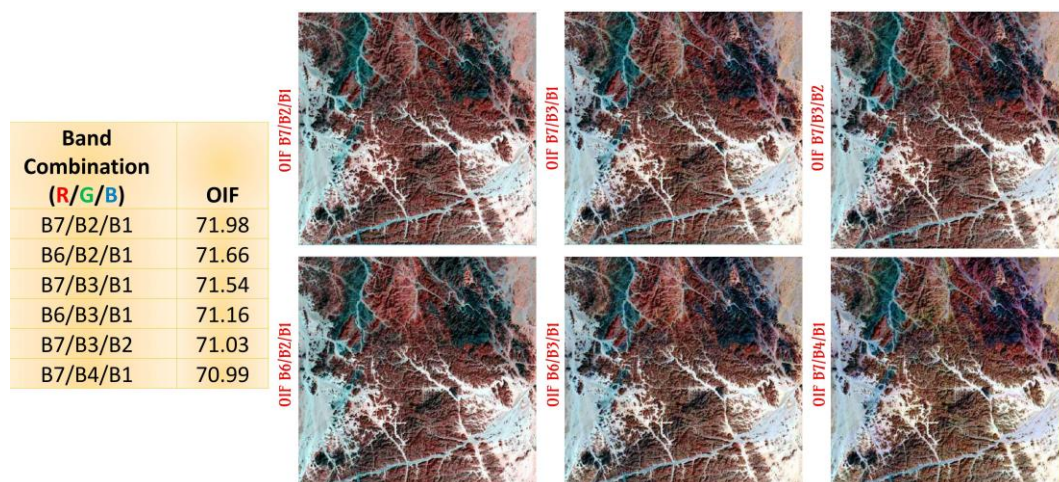


Рис. 21 Композитные изображения False Color (FCC)

Операции улучшения изображения выполняются для облегчения визуальной интерпретации. Преимущество цифровых изображений в том, что они позволяют нам манипулировать значениями цифровых пикселей в изображении. Процесс визуальной

интерпретации цифрового улучшения изображения оптимизирует взаимодополняющие способности человеческого разума и компьютера. Разум отлично интерпретирует пространственные атрибуты изображения и способен выборочно идентифицировать неясные или едва различимые особенности. Однако глаз плохо различает небольшие радиометрические или спектральные различия, которые могут характеризовать такую особенность. Компьютерное усовершенствование направлено на визуальное усиление этих незначительных различий, чтобы сделать их легко наблюдаемыми (рис. 22).

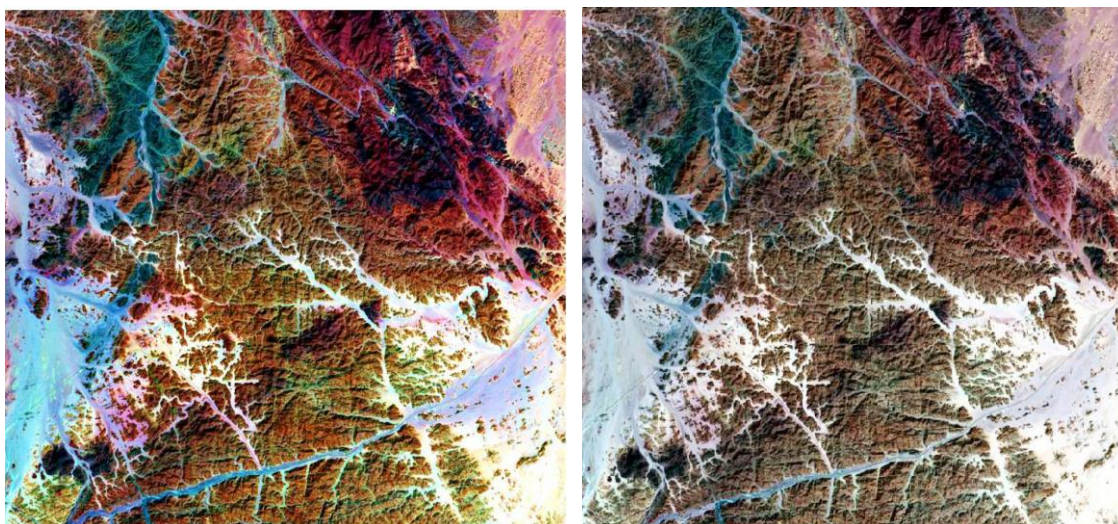


Рис. 22 Насыщенность Растягивание R7 G5 B3 (а) и Линейная 2% R7 G5 B3 (б).

Радиометрическое усиление (улучшение контрастности) или модификация гистограммы — это самый простой, но и самый эффективный метод оптимизации контраста и яркости изображения для визуализации или выделения информации в определенных диапазонах DN. Улучшение изображения применяет стратегию расширения диапазона яркости, используемого для отображения изображения, тем самым выявляя функции, которые могут быть не видны в исходной версии.

Линейная контрастная растяжка. Это наиболее часто применяемое преобразование, при котором старый диапазон серого линейно расширяется, чтобы занять весь диапазон уровней серого в новой шкале. Это включает в себя определение нижней и верхней границ гистограммы (обычно минимальное и максимальное значения яркости). Linear 2% применяет линейное растяжение с отсечением 2% на обоих концах отображаемые данные, т.е. 2% самых ярких пикселей отображаются как белые (255), а 2% самых темных пикселей отображаются как черные (0). Все остальные значения серого линейно отображаются между этими крайними значениями. Это растяжение, которое Envi выполняет по умолчанию с каждым дисплеем.

Выравнивание гистограммы — очень полезный метод повышения контрастности. Он преобразует входное изображение в выходное с равномерным (скорректированным). Идея

повышения контрастности (HE) заключается в том, что представление данных изображения должно быть равномерно распределено по всему диапазону значений. Однако в действительности HE часто выдает изображения со слишком высоким контрастом. Это связано с тем, что естественные сцены с большей вероятностью будут следовать нормальному (гауссову) распределению и, следовательно, человеческий глаз приспособлен быть более чувствительным к различению тонких изменений уровня серого при средней яркости, чем при очень высокой или очень низкой. Это преобразование целесообразно, когда отдельное изображение должно отображаться в черно-белом цвете, но оно не особенно подходит для создания цветных. Выравнивание гистограммы R7 G5 B3 (рис. 23)

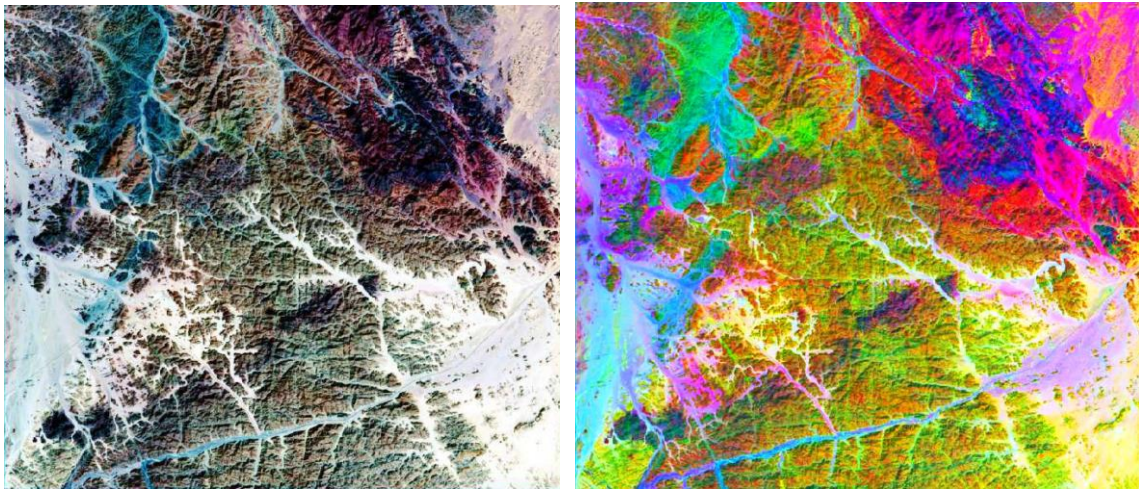


Рис. 23 Выравнивание гистограммы R7 G5 B3 (а) и Декорреляционное растяжение R7 G5 B3 (б)

Saturation Stretch для улучшения цвета 3-канального входного изображения путем создания выходных полос с более насыщенными цветами. Входные данные преобразуются из пространства красного, зеленого и синего (RGB) в пространство оттенка, насыщенности и значения (HSV). Гаусс-растяжение выполняется в полосе насыщенности, поэтому данные заполняют весь диапазон насыщенности. Затем данные HSV автоматически преобразуются обратно в пространство RGB.

Декорреляционное растяжение - полезный метод устранения высокой корреляции, обычно встречающейся в мультиспектральных наборах данных и для получения более красочного цветного составного изображения. Наборы данных с высокой степенью корреляции часто дают довольно бледные цветные изображения. Он включает следующие этапы: (1) преобразование главного компонента, за которым следует (2) выравнивание контраста с помощью гауссовского растяжения, так что гистограммы всех основных компонентов аппроксимируют гауссово распределение заданной дисперсии, что приводит к трехмерному изображению. Составная гистограмма сферически-симметричного трехмерного гауссовского типа, а затем (3) преобразование координат, обратное вращению главного компонента, для проецирования данных в исходное пространство.

Слияние изображений относится к методам интеграции изображений или наборов растровых данных с разным пространственным разрешением или с разными свойствами для создания новых изображений. Объединение двух наборов данных может быть выполнено для получения одного набора данных с качествами обоих. Слияние изображений — это метод повышения качества и пространственного разрешения изображения путем объединения спектральной информации изображений с низким пространственным разрешением с изображениями с высоким пространственным разрешением. Результирующее изображение имеет высокое спектральное разрешение и то же качество, что и изображение с высоким пространственным разрешением.

Повышение резкости по Бовер. - этот метод представляет особый интерес для повышения резкости изображения. Он поддерживает радиометрическую целостность данных при увеличении пространственного разрешения. Этот метод нормализует полосу по интенсивности, а затем нормализованную полосу умножают на высокочастотную. Преимущество этого метода заключается в том, что он оптически сохраняет спектральную информацию о полосе, одновременно повышая резкость сцены. Таким образом, набор из трех полос можно повысить резкость, а затем отобразить в RGB.

HSV Sharpening для преобразования изображения RGB в цветовое пространство HSV – это замена диапазона значений изображением с высоким разрешением, автоматическая повторная выборка оттенка и полосы насыщения до размера пикселя с высоким разрешением с использованием метода ближайшего соседа, билинейной или кубической свертки, и, наконец, преобразование изображения обратно в цветовое пространство RGB. Выходные изображения RGB будут иметь размер пикселя входных данных высокого разрешения.

Инструменты спектральной резкости Грамма-Шмидта и ПК создают изображения с панорамированием, но с использованием разных методов. Метод Грама-Шмидта более точен, чем метод ПК, и рекомендуется для большинства приложений, поскольку он использует функцию спектрального отклика данного датчика для оценки того, как выглядят панхроматические данные.

Растяжение декорреляции - это способ который используется для улучшения цветовых различий. Методика основана на удалении межканальной корреляции с каждым пикселем. Это особенно эффективно при анализе многоспектральных наборов данных (комбинации диапазонов SWIR или TIR). Использовалось растяжение декорреляции комбинации 14, 12, 10 полос TIR в RGB.

Методика спектрального углового картирования (SAM) - это контролируемая классификация, которая зависит от углов между пиксельными спектрами изображения и

обучающими данными (ROI) или библиотечными спектрами выбранных эталонов. Алгоритм определяет сходство между двумя спектрами, вычисляя спектральный угол между ними. Результатом SAM является классифицированное изображение, значения пикселей которого представляют угол альфа (α) в радианах, который измеряется для каждого эталонв. Картирование спектральных углов было применено для выбранных минералов гидротермальных изменений (каолинита, хлорита и эпидота) из спектральной библиотеки USGS и затем произведена повторная выборка для спектрального разрешения ASTER.

Оптимальный индексный фактор (OIF). На основании результатов, полученных от OIF, комбинация 5, 2 и 1 показывает наивысшее значение OIF с первым рангом. Эта комбинация полос содержит больше всего информации с наименьшим количеством дублирований, поэтому границы между горными породами и другими геологическими особенностями очень четкие.

Улучшение изображения. Радиометрическое улучшение (улучшение контрастности), пространственное усиление (улучшение контрастности), растяжка насыщенности Gram-Schmidt.

Соотношение каналов (BR) Color Composite Image. Точно так же, как данные в изображении могут отображаться в виде изображений отдельных каналов в оттенках серого или в виде трехканальных цветных изображений, так же могут отображаться различные арифметические комбинации каналов. Наиболее полезным из них является отношение одной полосы к другой. Ее готовят, просто разделив DN каждого пикселя в одной полосе на DN для соответствующий пиксель в другой полосе. Теоретически это должно дать диапазон новых значений для пикселя от нуля до бесконечности, потому что некоторые DN будут иметь нулевые значения. Из-за ограниченного диапазона в каждой полосе данных и сильной корреляции между полосами на практике отношения редко выходят за пределы диапазона 0,0–4,0. Отображение изображения отношения требует перемасштабирования этих значений с плавающей запятой до диапазона целых чисел 0-255. Наиболее важным свойством пропорционального изображения является то, что оно подчеркивает особенности кривой спектральной сигнатуры конкретного поверхностного материала. Если используемые полосы охватывают пики, впадины поглощения или изменения наклона спектральной кривой, то, объединенные попарно в виде соотношений, они хорошо отражают аспекты спектральной характеристики материала и обеспечивают изображение, которое может быть совершенно не зависеть от условий освещения. Пиксели приобретают одно и то же значение DN, если материал грунта имеет одинаковое спектральное соотношение, совершенно независимо от того, находится ли грунт в хорошо или плохо

освещенной зоне. Следовательно, правильно сделанное изображение с соотношением сторон значительно уменьшает топографические эффекты.

Из-за взаимодействия различных длин волн с различными элементами породы, а также более высокой чувствительности человеческого глаза к изменениям в цветных изображениях по сравнению с изменениями тона в черно-белых, различные комбинации полос используются для выделения различных явлений. Присвоение одного из трех основных цветов - красного, зеленого и синего - каждой длине волны создает цветовую комбинацию, наиболее важной из которых является композитный ложный цвет (FCC). В методе band ratio отношение значений одинаковых пикселей местоположения вычисляется для двух желаемых полос. С помощью соотношения полос удаляются некоторые факторы и параметры с неблагоприятными последствиями (например, топография), этот метод может быть использован для обнаружения изменений, которые не могут быть распознаны на однополосных изображениях.

Примеры преобразований ДДЗ:

Предварительная обработка данных Landsat-8 OLI/TIRS (рис. 24) состоит из операций, которые подготавливают данные для последующего анализа, для исправления или компенсации систематических ошибок. Цифровые изображения подвергаются нескольким коррекциям, таким как радиометрическая и атмосферная. Данные Landsat-8 были преобразованы в отражательную способность поверхности методом верхних слоев атмосферы (ТОА) с использованием E_{pv} , который рекомендуется для калибровки при минералогическом картировании, поскольку он не требует предварительного знания образцов, отобранных в полевых условиях. Термическая атмосферная коррекция выполняется на полосах TIR методом нормализованной пиксельной регрессии. Полосы TIR с разрешением 90 м подвергаются повторной выборке, чтобы соответствовать 30-метровым пространственным измерениям для некоторых приложений обработки изображений. Повторная выборка ближайшего соседа используется для сохранения исходных значений пикселей в изображениях с повторной выборкой.

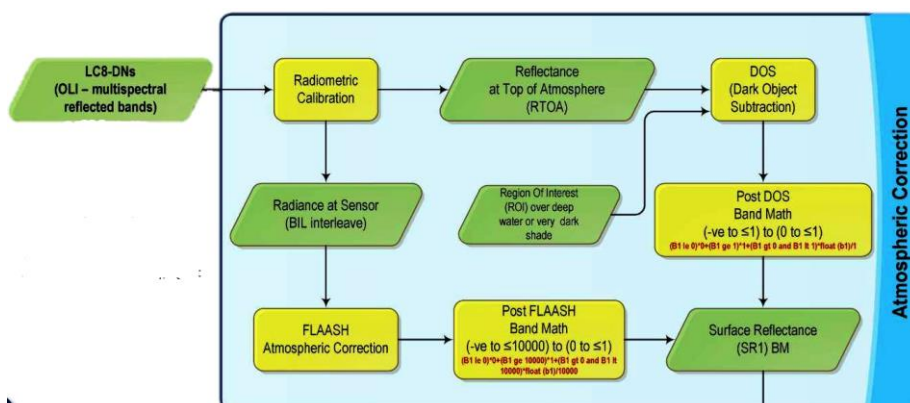


Рис. 24 Предварительная обработка данных Landsat-8 OLI/TIRS

Спектральные диапазоны Landsat 8 OLI VIS/NIR и IR с низким пространственным разрешением (30 м) комбинируются с панхроматическим диапазоном высокого разрешения (15 м) Landsat 8 OLI (канал 8), с панорамированием SPOT высокого разрешения (панхроматический диапазон с разрешением 10 м и с панорамированием Orbit View-3 (панхроматический диапазон с 5 м разрешением), для создания объединенного изображения с высоким спектральным и пространственным разрешением (рис. 25).

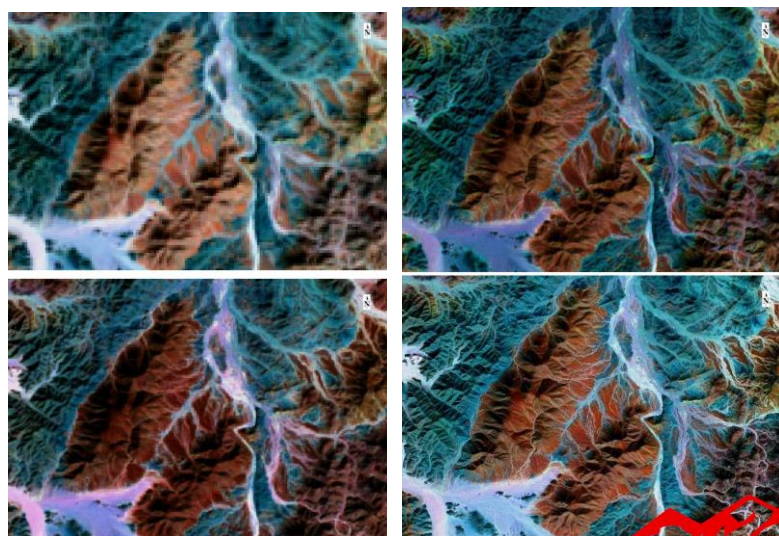


Рис. 25 Разрешение 30 м R7 G5 B3 (а), Разрешение HSV 15 м R7 G5 B3 (б), Разрешение HSV 10 м R7 G5 B3 (в), Разрешение Грамма-Шмидта 5 м Р7 Г5 В3 (г).

Предварительная обработка изображений АСТЕР состояла в коррекции перекрестных помех зон SWIR каждого изображения ASTER с использованием программного обеспечения ASTER GDS. Полосы VNIR и SWIR были «сложены» в один файл с разрешением 30 м. Затем этот составной файл был подвергнут атмосферной коррекции с использованием модуля FLAASH для ENVI.

Методика совмещения ложных цветов была использована для комбинирования мультиспектральных изображений с помощью цветового кодирования. Использовалась подтвержденная комбинация диапазонов в RGB ASTER (7, 3, 1), эквивалентная комбинации диапазонов Landsat Thematic Mapper (TM) (7, 4, 2). Эта комбинация наиболее эффективна для картирования литологических единиц, а также структурных и др. особенностей.

Методика соотношения зон была использована для увеличения спектральных различий между зонами и уменьшения влияния рельефа. Были отобраны лучшие соотношения зон, которые давали больше различий для картирования пород.

На основе анализа спектральных свойств TIR типичных горных пород предложено несколько минералогических индексов, включая кварцевый индекс (QI) и основной индекс (MI) для определения минералогического или химического состава силикатных пород для

данных ASTER-TIR. Эти минералогические индексы обеспечивают единый подход к литологическому картированию.

Предварительная обработка данных Sentinel-2 выполняется с помощью программного обеспечения Qgis, как для радиометрической коррекции, так и для калибровки (рис. 26-30).

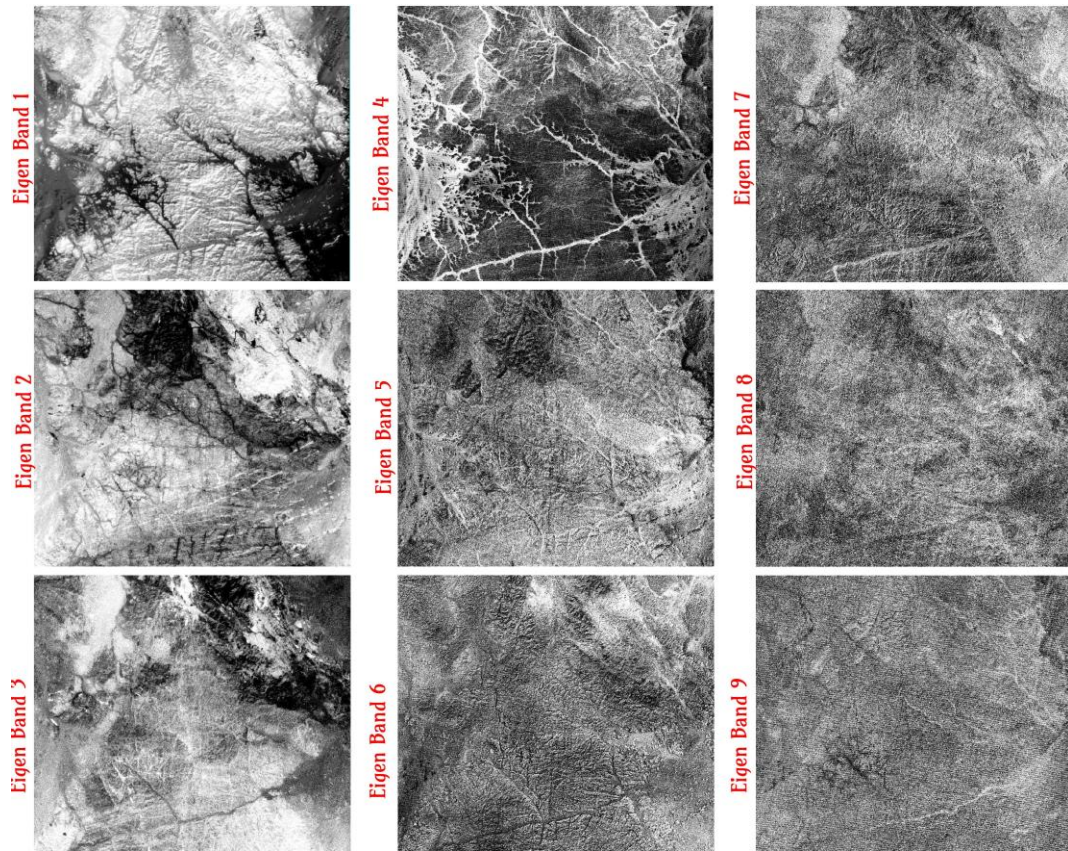


Рис. 26 Изображения собственных значений

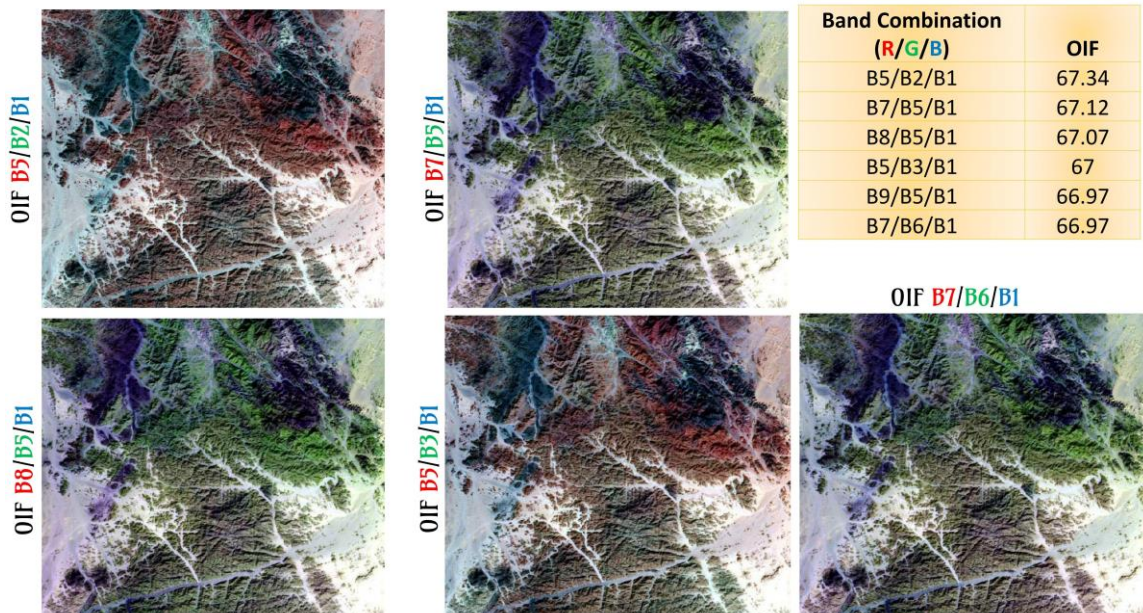


Рис. 27 Композитные изображения False Color (FCC)

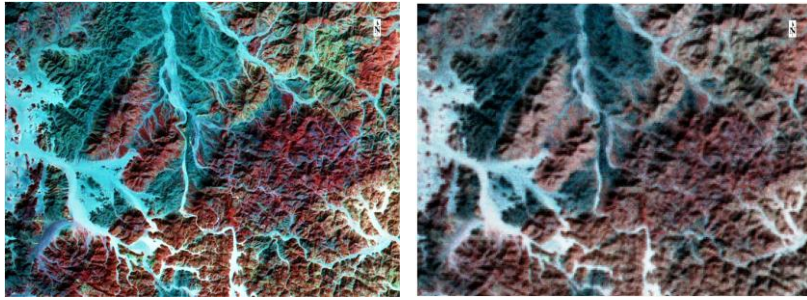


Рис. 28 Сравнение ложных цветов Радиометрические и пространственные улучшения
(а) Разрешение 10 м B5/B2/B1 (б) Разрешение 30 м B5/B2/B1

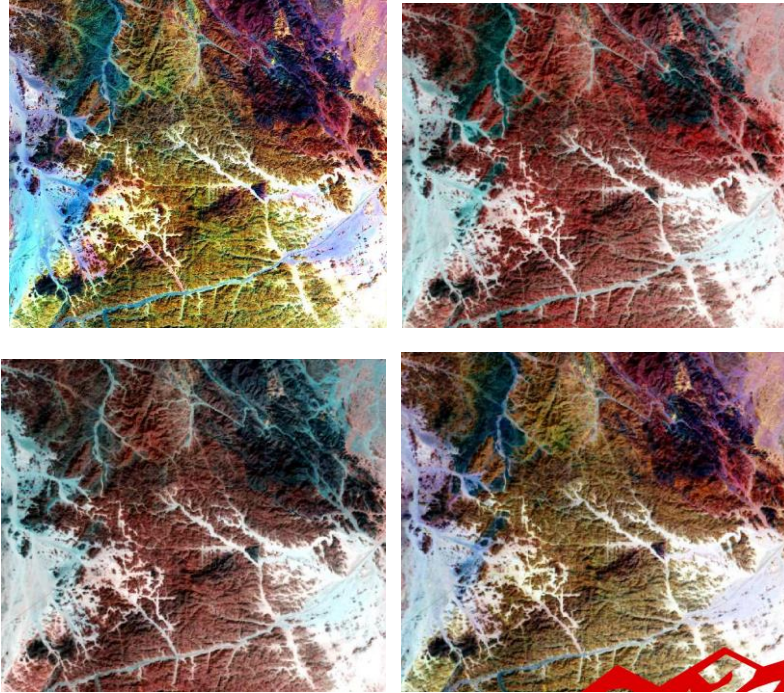


Рис. 29 Радиометрические и пространственные улучшения
(а) Разрешение 10 м B5/B2/B1 (б) OIF B12/B2/B1 (в) OIF B10/B2/B1 (г) OIF B12/B9/B1

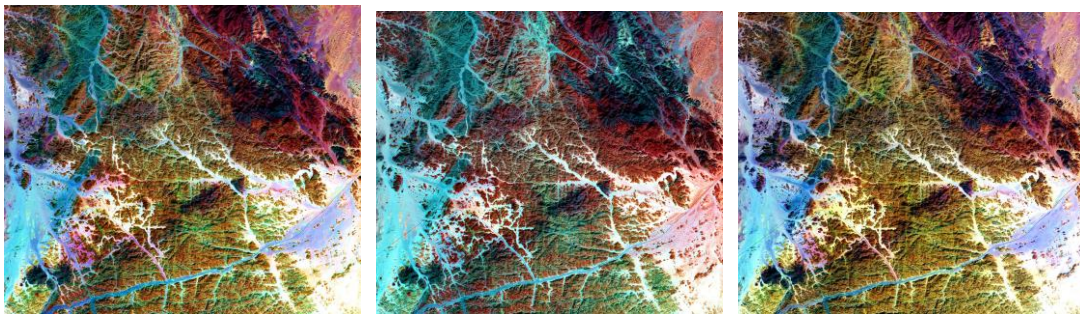


Рис. 30 Радиометрическое и пространственное улучшенное изображение, (а) разрешение 10 м B7/B5/B3 Landsat 8 (б) разрешение 10 м B5/B2/B1 Aster, (в) разрешение 10 м B12/B9/B1 Sentinel-2

4. Области применения в поисковых целях.

Применение ДДЗ в различных областях, а именно: картирование рельефа земной поверхности, почвенное и растительное картирование, экология дикой природы, археология, сельское и лесное хозяйство, землеустройство, водные ресурсы, городское и региональное планирование, экологическая оценка и др. - это программы в реальном времени различных мировых агентств. Каждый объект имеет уникальную спектральную характеристику (рис. 31).

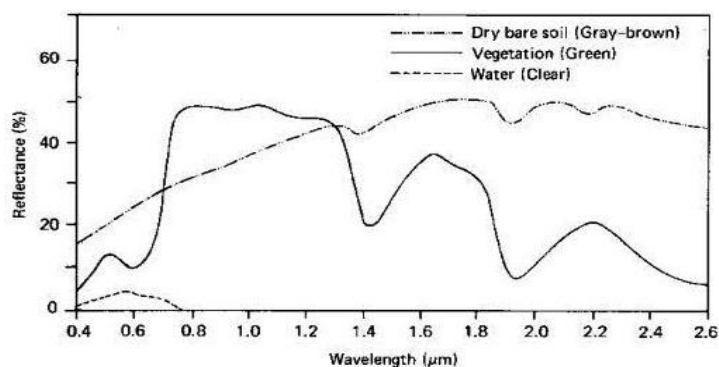


Рис. 31: Пример спектральной отражательной способности для растительности, почвы и воды

С помощью ДДЗ выявляются литологические, геоморфологические, структурные и др. ориентиры, необходимые для понимания различных параметров, ответственных за локализацию большинства рудных месторождений. Использование ДДЗ вместе с усовершенствованными географическими информационными системами (ГИС) и интеграции с другими геофизическими, геохимическими и геологическими данными значительно расширилось в поисковых работах на различные типы месторождений ТПИ.

4.1 Картирование линеаментов.

Линеаменты играют важную роль в контроле различной минерализации. Анализ плотности линеаментов, а также конкретные типы разломов и зоны их пересечений является типичными критериями структурного контроля минерализации. Технология выявления линеаментов на ДДЗ представлена на рис. 32.

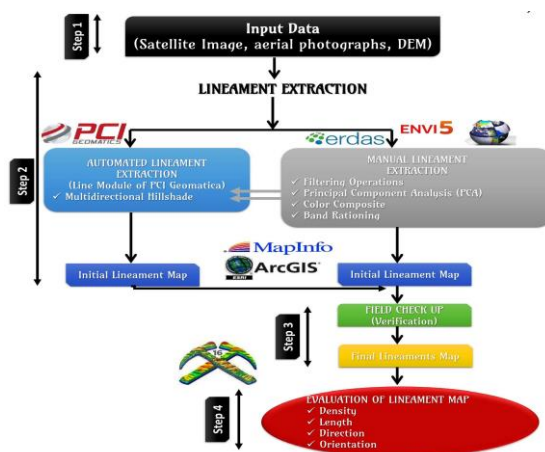


Рис. 32 Технологии выявления линеаментов.

Она состоит из четырех последовательных шагов: первым шагом является выбор исходных данных для анализа; второй шаг — выделение линеаментов с использованием ручного и автоматизированного методов выделения линеаментов и их сравнение; третий шаг - тестирование окончательной карты с имеющейся картой разломов района; последним шагом является оценка карты линеаментов, которая включает анализ плотности, направлений и зон пересечений.

Ручное выделение линеаментов. При ручном методе традиционно используется визуальная интерпретация ДДЗ. Знания и опыт пользователя являются ключевым моментом в идентификации линеаментов. Они обычно выглядят как прямые линии тональных, текстурных и др. различий на снимках. Некоторые общие черты, традиционно помогающие идентифицировать линеаменты, представляют собой: топографические особенности, такие как прямые долины, непрерывные уступы; прямые скальные границы; систематические смещения рек; внезапные тональные вариации растительности и др.

Существует несколько способов улучшения изображения, которые могут способствовать ручному выделению линеаментов - это операции фильтрации, анализ главных компонентов (РСА), спектральное нормирование и цветовые композиции.

Операции фильтрации линеаментов. Одной из характерных особенностей ДДЗ является параметр, называемый пространственной частотой, который определяется как количество изменений значения яркости на единицу расстояния для какой-либо конкретной части изображения. Если в данной области изображения очень мало изменений значения яркости, это называется низкочастотной областью. И наоборот, если значения яркости сильно изменяются на коротких расстояниях, это высокочастотная область. Следовательно, операции фильтрации используются для выделения или ослабления пространственной частоты в изображении. Эта частота может быть связана с наличием линеаментов в этом районе. Другими словами, операция фильтрации сделает границу, существующую между соседними единицами, более четкой. Основным недостатком метода фильтрации является то, что он не может эффективно выделять линеаменты в слабоконтрастных областях, где элементы вытянуты параллельно направлениям солнца и в тенях гор. Фильтр высоких частот выборочно усиливает мелкомасштабные элементы изображения (высокочастотные пространственные компоненты), сохраняя при этом крупномасштабные элементы (низкочастотные компоненты), которые составляют большую часть информации в изображении.

Направленные фильтры (фильтры обнаружения краев) предназначены для улучшения линейных объектов, таких как дороги, реки, разломы и т. д. Фильтры могут быть разработаны для улучшения объектов, ориентированных в определенных направлениях.

Быстрый фильтр - обнаружение вертикальных и горизонтальных краев и объединение двух полученных изображения вместе для создания окончательного отфильтрованного изображения. Вертикальные и горизонтальные фильтры представляют собой ядра 3×7 и 7×3 , предназначенные для улучшения вертикальных и горизонтальных краев тренда. Фильтры Собеля, Превитта и Кирша — это горизонтальные фильтры, применяющие отрицательный вес к одному краю ядра 3×3 и положительный вес к другому краю со средними пикселями без взвешивания или с отрицательным взвешиванием (Кирш). Фильтр верхних путей Фильтр нижних путей Фильтр быстрых краев (рис. 33)

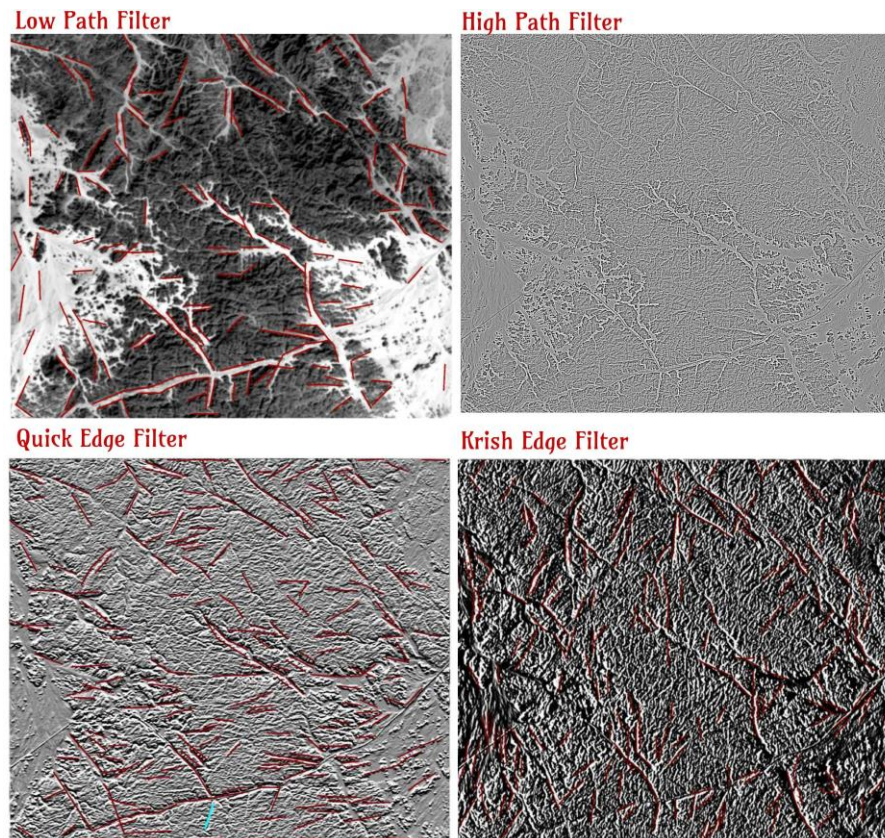


Рис. 33 Фильтрация операций выделения линеаментов.

Анализ главных компонент (PCA). Первый компонент PCA состоит из информации как ближнего, так и среднего инфракрасного диапазона (например, полосы 4, 5 и 7), а цветовая композиция PCA обеспечивает хороший вариант для визуальной интерпретации. Линеаменты могут быть легко идентифицированы с помощью PCA изображения Landsat ETM, который удаляет избыточную информацию из видимых и мультиспектральных данных NIR.

Автоматические операции выделения линеаментов.

Для извлечения линеаментов используются следующие алгоритмы/программное обеспечение: LESSA (извлечение линеаментов и статистический анализ полос), алгоритм отслеживания сегментов (STA), преобразование Хаара, PhotoLin, преобразование Хафа и PCI Geomatica.

Основными преимуществами автоматического выделения линеамента по сравнению с ручным выделением линеамента являются: возможность унифицированного подхода к разным изображениям; способность извлекать линеаменты, которые не распознаются человеческим глазом в короткие сроки.

Линейные модули PCI извлекают линеаменты из любого 8-битного изображения в три этапа: обнаружение границ, определение порога и извлечение кривой. Задается радиус фильтра обнаружения краев в пикселях. Этот параметр приблизительно определяет уровень наименьшей детализации во входном изображении, которое необходимо обнаружить. Большое значение радиуса фильтра указывает на то, что можно обнаружить меньше деталей, а также меньше шума. Значение по умолчанию 10 указывает пороговое значение в пикселях для минимального уровня градиента для краевого пикселя. Это значение должно быть в диапазоне от 0 до 255; значение по умолчанию — 100.

Порог длины кривой определяет минимальную длину кривой в пикселях, которую следует рассматривать как линеамент или для дальнейшего рассмотрения; например, связывание с другими кривыми. Значение по умолчанию — 30.

Порог ошибки аппроксимации линии задает максимальную ошибку в пикселях, допустимую при подгонке к пиксельной кривой. Более низкие значения обеспечивают лучшее соответствие, но и более короткие сегменты. Более низкое значение приводит к множеству более коротких сегментов линии, которые лучше аппроксимируют линеамент; однако большее значение обеспечивает лучшее усреднение шума, что приводит к более длинным и прямым линеаментам. Как правило, значение от 2 до 3 является идеальным.

Порог угловой разницы указывает максимальный угол в градусах между сегментами линии. Если угол превышает указанный максимум, линия сегментируется на два или более векторов. Этот угол также определяет максимальный угол между двумя векторами, чтобы они были связаны. Значение по умолчанию — 30.

Порог расстояния связи указывает минимальное расстояние в пикселях между конечными точками двух векторов, чтобы они были связаны. Значение по умолчанию — 20.

Например, были применены на полосе 7 Landsat 8 OLI операции автоматического выделения линеаментов с пространственным разрешением 30*30 метров; поскольку эта полоса наиболее полезна для выявления линеаментов, а также других геологических особенностей, таких как типы горных пород и минералов.

Для создания окончательной карты необходимо объединение линеаментов выделенных вручную и автоматически и стирание дублирующихся.

4.2 Литологическое картирование.

Картирование различных типов горных пород на снимках в благоприятных ландшафтно-геоморфологических условиях не представляет сложности из-за их непохожих фотохарактеристик - четких тональных различий и ландшафтной выразительности.

В основе достоверного картирования лежит цифровая обработка изображений ДДЗ (см. ранее). Она разделена на две части: улучшение цифрового изображения, где выполняются цветовые композиции, контрастное растяжение, фильтрация и улучшение краев, нарезка по плотности, пороговое значение, IHS, временная композиция и синергетические изображения, а также обработка и извлечение новых цифровых изображений (контролируемая, неконтролируемая и нечеткая классификации, преобразование изображения, анализ главных компонент и т.д.).

Некоторые программы обработки изображений, такие как ERDAS Imagine, ILWIS, Envi, ArcGIS, MATLAB и т. д. максимально полезны для цифровой обработки изображений в целях литологического картирования.

4.3 Выявление зон гидротермально-метасоматических изменений пород.

Картографирование гидротермально измененных пород, являющихся обычными индикаторами оруденения, является неотъемлемой частью поисков полезных ископаемых. Многоспектральные ДДЗ со средним разрешением уже давно применяются для картирования измененных горных пород, предлагая широкий пространственный охват, низкую стоимость и простой анализ изображений.

Различные характеристики гидротермального рудного флюида, такие как температура, соотношение флюид/порода, а также химические различия вмещающих пород, приводят к появлению различных гидротермальных минералов. Это вызывает развитие гидротермальной зональности и дает важную информацию для поисков. Расположение рудной залежи и тип рудной залежи можно оценить по минералогическому составу гидротермальных изменений и по характеру возникновения зональности гидротермальных изменений.

Тип и состав минералов могут быть выявлены и интерпретированы путем изучения их характеристик поглощения в оптическом электромагнитном диапазоне. Минералы гидротермальных изменений, создающие зональность, имеют характерные картины поглощения, особенно в коротковолновой инфракрасной (SWIR) области (от 2,0 до 2,5 мкм). Эти спектральные сигнатуры в сочетании со спектральным разрешением различных типов изображений предоставляют возможности выявления различных зон изменений пород на поверхности по ДДЗ. Поскольку различия в спектральных характеристиках поглощения многих минералов незначительны, выбор эффективного метода для извлечения спектральных характеристик минералов имеет важное значение. Устранение

избыточной информации и шума путем извлечения спектральных характеристик может ускорить и улучшить интерпретацию. Существует несколько методов выделения признаков и уменьшения размерности ДДЗ, в том числе широко используемые методы соотношения полос и анализ главных компонентов (РСА).

Оксиды железа, глина и карбонат + сульфат в зонах гидротермальных изменений имеют специфические спектральные характеристики в видимой ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) спектральных областях соответственно. Составные изображения с ложными цветами (FCC) и комбинированные изображения с полосами используются на основе известных спектральных характеристик минеральных фаз в определенных областях длин волн. Картирование зон гидротермальных изменений является основным направлением программ ГРП с использованием ДДЗ. Большинство видов минералов гидротермальных изменений имеют отличительные особенности в коротковолновой инфракрасной области (SWIR), что делает датчики Landsat-8 OLI и ASTER подходящими источниками данных для их картирования. Значительное количество методов обработки изображений, таких как нормирование полос (BR), анализ главных компонентов (РСА) и спектрально-минералогические индексы, доказали свою эффективность при составлении карт гидротермальных изменений.

Минералы, которые на сегодняшний день были успешно идентифицированы с помощью гиперспектрального дистанционного зондирования, включают: ОН-содержащие минералы, карбонаты, сульфаты, оливины, пироксены, оксиды и гидроксиды железа. Алунит и каолинит, которые представляют собой гидротермальные минералы, присутствующие в расширенных глинистых гидротермальных изменениях, имеют абсорбцию на 2,16 мкм и 2,2 мкм, которая создается связью гидроксидов алюминия. Серицит, который является типичным гидротермальным минералом в филлических гидротермальных изменениях, имеет поглощение при 2,2 мкм, которое также создается связью Al-OH. Хлорит, эпидот и кальцит, присутствующие в пропиловых изменениях, имеют поглощение на длине волны 2,35 мкм, которое создается связью гидроксидов магния (Mg-OH) и углеродной связью (CO₃).

Спектральный анализ с использованием красного (0,63–0,69 мкм), зеленого (0,52–0,60 мкм) и синего (0,45–0,52 мкм) сочетания полос истинного цвета (3–2–1) позволяет картировать области с повышенными концентрациями оксидов железа (рис. 34).

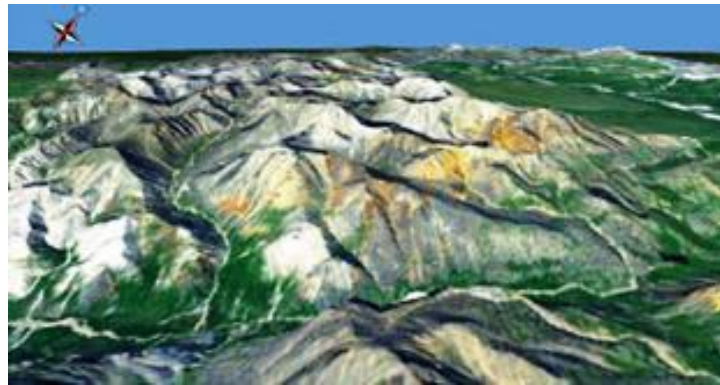


Рис. 34 Пример повышенных концентраций оксида железа на поверхности (цветовая полоса сочетание 3-2-1)

Минералы оксида и гидроксида железа, такие как лимонит, ярозит и гематит, имеют тенденцию к спектральному поглощению в видимом и среднем инфракрасном диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм электромагнитного спектра (рис. 35).

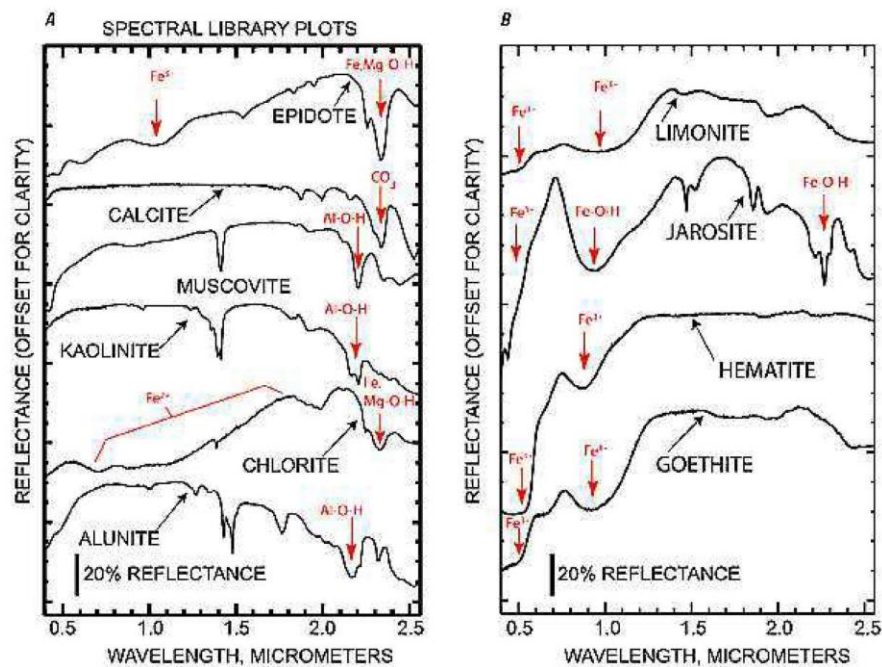


Рис. 35 (А) Лабораторные спектры эпидота, кальцита, мусковита, каолинита, хлорита и алунита.
(В) Лабораторные спектры лимонита, ярозита, гематита и гетита

В 1980-х годах многоспектральный сканер Landsat (MSS) был впервые использован для картирования оксидов железа. С появлением Landsat Thematic Mapper (TM), предоставлявшего больше спектральных деталей, отношения диапазонов стали использоваться для разделения глинистых и неаргиллитовых минералов (с использованием TM 5/7) и для картирования оксидов железа (с использованием TM 3). Данные Landsat TM широко используются для широкого спектра применений, включая геологическое, литологическое и структурное картирование, а также в поисковых целях для картирования зон гидротермально-метасоматических изменений пород.

Соотношение каналов (BR) и цвет. Составные изображения (рис. 36). Наиболее распространенным типом изменения является распад полевых шпатов и

ферромагнезиальных минералов в различные глины и другие минералы, содержащие гидроксильные группы. Такие минералы могут быть обнаружены методами дистанционного зондирования, поскольку в коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазоне их спектров наблюдается поглощение. Кроме того, значительное число рудопроявлений содержат сульфидные минералы, в частности пирит, который разлагается до серной кислоты, а также ряд гидроксидов железа и комплексных сульфатов, которые имеют не только яркую окраску, но и обладают кристаллическим поглощением в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Этот набор признаков гидротермальных изменений оказался чрезвычайно полезным при оконтуривании различных месторождений гидротермальных руд. Хорошо известно, что трехвалентное железо проявляет ярко выраженные характеристики поглощения при 0,82 мкм и 0,35 мкм, тогда как двухвалентное железо имеет поглощение при 1,0, 4,8–2,0 и 0,55–0,45. Минералы, содержащие гидроксил, такие как глины, имеют большую поглощающую способность около 1,9, 2,35 и 2,5. Обнаружение вышеуказанных изменений использовалось в качестве ориентира для поисков рудных месторождений.

Oli Band Ratio	Min	Max	Mean	Stdev	Threshold value	Ratio Description	Confidence
B4/B2	0	255	146	58	204	Ferric Fe3	92%
B5/B6	0	255	124	55	234	Ferrous Fe2	95%
B6/B7	0	255	152	51	203	Clays Al-OH	92%

Рис. 36 Соотношение каналов (BR) и цвет.

С 2000 года усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения ASTER (в частности, диапазоны ASTER SWIR) стал «рабочей лошадкой» для картирования поверхностной минералогии. Несколько соотношений полос ASTER перекрываются со спектральным охватом Sentinel-2. С 2014 года данные нового поколения Sentinel-2 используются вместе с данными других спутниковых датчиков при поисках полезных ископаемых для картографирования параметров гидротермальных изменений пород (рис. 37).

Основные спектрально-активные минералы гидротермальных изменений:

1. Эпитермальный хай-сульфидейшн (Алунит, пирофиллит, дикит, каолинит, диаспор, зуньит, смектит, иллит).
2. Эпитермальный лоу-сульфидейшн (Серицит, иллит, смектит, хлорит, карбонат).
3. Порфир Cu–Au (Биотит, ангидрит, хлорит, серицит, пирофиллит, цеолит, смектит, карбонат, турмалин).
4. Карлинский тип Au (Иллит, дикит, каолинит)
5. Вулканогенный массивный сульфид (Серицит, хлорит, хлоритоид, карбонаты, ангидрит, гипс, амфибол)/

6. Архейское рудное золото, (Карбонат, тальк, тремолит, мусковит, парагонит).
7. Известковый скарн (Гранат, клинопироксен, волластонит, актинолит)
8. Ретроградный скарн (Кальцит, хлорит, гематит, иллит)
9. Магниевый скарн (Форстерит, серпентин-тальк, магнетит, кальцит)

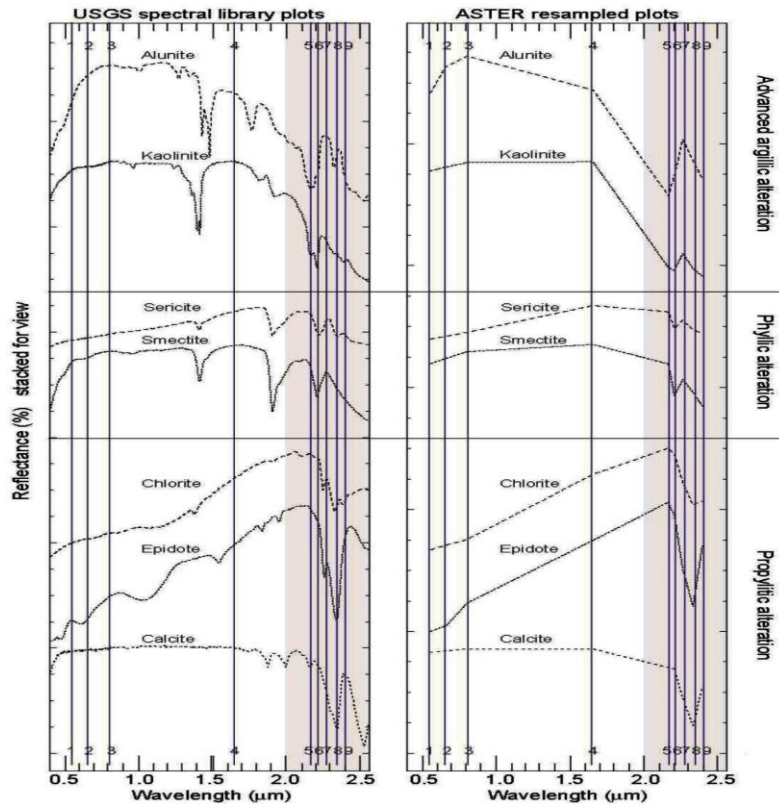


Рис.37 ASTER - спектральные картины гидротермальных минералов, связанных с медно-порфировой минерализацией.

Шесть полос ASTER SWIR были разработаны для выявления особенностей поглощения Al-OH, Fe, Mg-OH, Si-OH и CO₃. Диапазоны ASTER SWIR способны определять минералы гидротермальных изменений, такие как алунит, каолинит, кальцит, доломит, хлорит, тальк и мусковит. Полосы TIR, в дополнение к полосам VIS и SWIR, могут использоваться для определения минералогического состава кварцевых, карбонатных и силикатных пород.

Основные карбонатные минералы демонстрируют минимумы спектральной излучательной способности в полосе 14 ASTER из-за моды изгиба CO. Кварц демонстрирует минимум спектрального коэффициента излучения в полосах ASTER 10 и 12 и относительно более высокий коэффициент излучения в полосе 11. Для силикатных минералов широкий спектральный минимум коэффициента излучения смещается в сторону более длинных волн по мере увеличения содержания SiO₂. Поскольку спектральное и пространственное разрешение (90 м) данных ASTER TIR низкое, а также из-за характера спектральных особенностей минералов, только самые крупные и наиболее толстослоистые обнажения кварца и карбонатных минералов можно идентифицировать с помощью TIR.

Использование метода изображения относительной глубины полосы (RBD) — еще один способ различать разные минералы. Для каждого элемента поглощения числитель в RBD представляет собой сумму полос, представляющих плечи, а знаменатель представляет собой полосу, расположенную ближе всего к минимуму элемента поглощения. Изображения RBD полезны для отображения интенсивностей Al-OH, Fe, Mg-OH, и поглощение (рис. 38).

Feature	Aster Band Ratio	Min	Max	Mean	Stdev	Threshold value	Ratio Description
Iron Minerals	B2/B1	0	255	121	59	239	Ferric Fe3
	(B5/B3)+(B1/B2)	0	255	88	59	206	Ferrous Fe2
	B4/B2	0	255	96	60	216	Gossan
	B5/B4	0	255	96	56	208	Ferrous Silicates (biot, chl, amph) Cu-Au alteration
	B4/B3	0	255	97	60	217	Ferric Oxides
Carbonates/Mafic minerals	(B7+B9)/B8	0	255	113	63	239	Carbonate/Chlorite/Epидote
	B13/B14	0	255	142	57	199	Carbonate Index (Exoskarn (cal/dolom) 92% cfd
	(B6+B9)/(B7+B8)	0	255	110	62	234	Epидote/Chlorite/Amphibole (Endoskarn)
	(B6+B9)/B8	0	255	109	62	233	Amphibole/MgOH (Can be other MgOH or carbonate*)
	B6/B8	0	255	100	60	220	Amphibole
	(B6+B8)/B7	0	255	110	58	226	Dolomite
	(B7/B6)*(B4/B6)	0	255	150	57	207	Hydroxyl Group (OH) 92% cfd
	(B4/B5)*(B8/B6)	0	255	149	60	209	Kaolinite (KL) 92% cfd
	(B7/B5)*(B7/B8)	0	255	143	62	205	Alunite (AL) 92% cfd
(B6/B8)*(B9/B8)	0	255	102	62	226	Calcite (CLI)	
Silicates	(B5+B7)/B6	0	255	137	59	196	Sericite / Muscovite / Illite / Smectite (Phyllic alteration) 92% cfd
	(B4+B6)/B5	0	255	149	62	211	Alunite / Kaolinite (Pyrophyllite) 92% cfd
	B7/B6	0	255	146	60	206	Muscovite 92% cfd
	B7/B5	0	255	144	63	207	Kaolinite 92% cfd
	(B5*B7)/(B6*B6)	0	255	134	58	192	Clay 92% cfd
Silica Sio2	Thermal Bands 90m TIR						
	B14/B12	0	255	105	61	227	Quartz Rich Rocks Qz Index
	(B11/B10)*(B11/B12)	0	255	172	51	223	Quartz 92% cfd
	B12/B13	0	255	158	60	218	Silica (Basic Degree Index (gnt, cpx, epi, chl) (Exoskarn (gnt, px)) Mafic Index
	B13/B10	0	255	131	58	247	Silica
(B11xB11)/(B10B12)	0	255	156	50	206	Silica Index 92% cfd	
Gold Copper Porphyry Alteration	B4/B6	0	255	153	55	208	Advanced argillic 92% cfd
	B5/B6	0	255	116	67	250	Phengitic (sericite)
	B5/B8	0	255	105	62	229	Propylitic & Calcite Alteration

Ferric Fe³⁺ Minerals B2/B1 Ferrous Fe²⁺ Minerals (B5/B3)+(B1/B2) Gossan (B4/B2) Ferrous Silicate (biot, chl, amph) (B5/B4) Ferric Oxides (B4/B3)

Epидote/Chlorite/Amphibole (Endoskarn) (B6+B9)/(B7+B8) Hydroxyl Group (OH) (B7/B6)*(B4/B6) Kaolinite (KL) (B4/B5)*(B8/B6) Alunite (AL) (B7/B5)*(B7/B8) Calcite (CLI) (B6/B8)*(B9/B8)

Sericite / Muscovite / Illite / Smectite (Phyllic alteration) (B5+B7)/B6 Alunite / Kaolinite / Pyrophyllite (B4+B6)/B5 Advanced argillic (B4/B6) Propylitic & Calcite Alteration (B5/B6) Quartz Rich Rocks (Qz Index) B14/B12

Рис. 38 Отношения полос АТЕР (BR) и (RBD), используемые в качестве индикаторов минералогии (железистые минералы, карбонаты/мафические минералы, силикаты и кремнезем).

Составные изображения. Sentinel-2 обладают способностью различать различные фазы вторичного железа благодаря более высокому спектральному разрешению в красной и ближней инфракрасной части спектра (рис. 39).

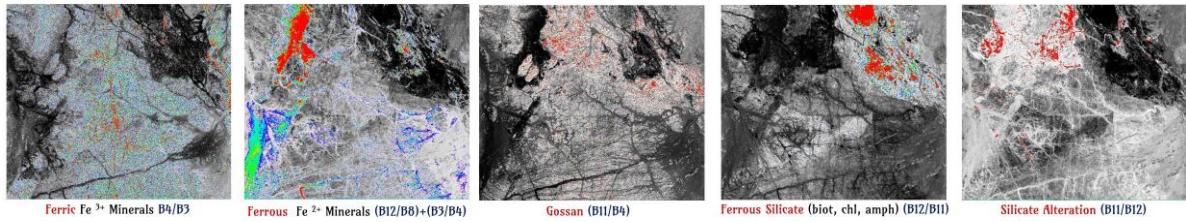


Рис. 39 Отношения сигнальных полос (BR) и (RBD), используемые в качестве индикаторов минералогии. (железистые и силикатные минералы).

Оксиды железа, глинистые и карбонатно-сульфатные минеральные фазы в зонах гидротермальных изменений имеют специфические спектральные характеристики в видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой областях инфракрасного излучения. Водные минеральные фазы с ОН-группами (Mg-O-H, Al-O-H, Si-O-H) и CO₃ кислотные группы обладают диагностическими свойствами поглощения в коротковолновой инфракрасной области (SWIR) (2,0–2,50 мкм).

5. Примеры использования ДЗ

Ряд исследований продемонстрировали полезность разнотипных данных ДЗ для геологического картирования и поисков:

- данные Landsat Thematic Mapper (TM) для картирования комплексов гидротермальных изменений, включая гидроксилсодержащие и железоксидные минералы в Неваде;
- данные ASTER для картирования аргиллитовых и филлитовых измененных пород вблизи медно-порфировых месторождений в магматической дуге Загрос в Иране;
- данные ASTER из Абу-Маравата (Египет) для разделения минерализованных и неминерализованных пород на основе содержания вторичных минералов оксида железа;
- данные Landsat 8 OLI, Aster и Sentinel-2 для картирования гидротермально измененных пород в районе Эль-Бейда (Египет).

5.1 Применение ДЗ при геологическом картировании и поисках

(р-н Эль-Бейда, Египет)

Район занимает площадь около 378 км² (рис. 39). Он представляет собой умеренно гористую местность, рассеченную долинами Вади-эль-Абиед и Вади-эль-Бейда. Район сложен метаосадками, метавулканитами от среднего до основного составов, метавулканическими породами от кислых до средних и метагаббро, которые регионально метаморфизованы в фациях зеленых сланцев. Они прорваны син- и позднектоническими тоналитами и расчленены серией даек и жил.

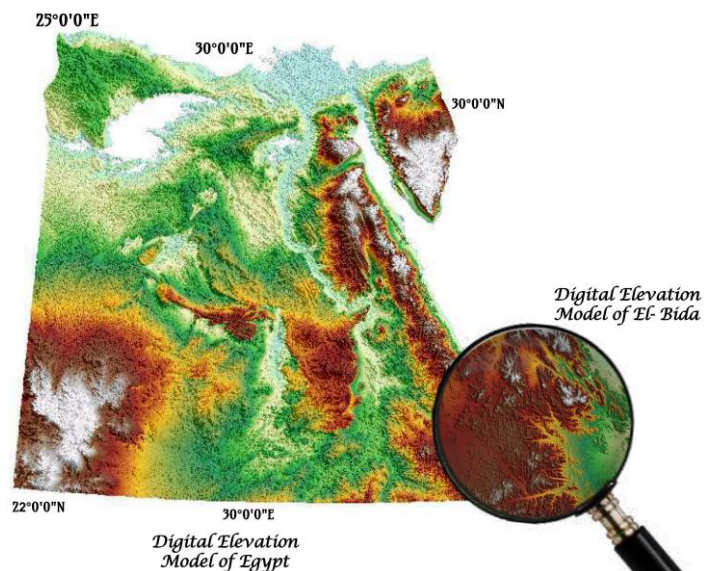


Рис. 39 Изображение района Эль-Бейда.

Все задачи обработки изображений в этом районе были выполнены с использованием Envi®-программное обеспечение для обработки и анализа изображений версии 5.1. После выполнения необходимых этапов предварительной обработки были реализованы широко

используемые методы обработки изображений, включая композицию полос, соотношение полос, анализ главных компонент (PCA) и минимальную долю шума (MNF).

Литологическое картирование.

Метавулканыты и метаосадки района Эль-Бейда можно легко отличить от гранитоидов на основе отчетливых тональных различий. Метавулканыты, средние и основные, были очерчены с достаточной степенью точности на основе четкого геоморфологического выражения и чередования темно-пурпурных и голубых тонов с плотными породами с высоким сопротивлением и очень грубой текстурой с высоким рельефом. Метаосадочные породы имеют дренажную структуру Trellis из-за областей параллельных трещин и имеют темно-голубой цвет с гладкой текстурой. Среди метаосадков, выделяются два овальных пятна аномального светло-коричневого тона, обладающие слоистостью и грубой текстурой, интерпретируемые как группа кислых метавулкаников. Гранодиоритовые породы, занимающие большую часть перспективной на оруденение площади, оконтурены на основе отчетливой рельефной выразительности и чередования темных и светлых тонов, представленных зеленовато-коричневыми тонами, низким рельефом и сильной трещиноватостью. лежащий на прерывистых участках метагаббро, который имеет чередующиеся темные цвета, очень темно-голубой и фиолетовый (рис. 40).

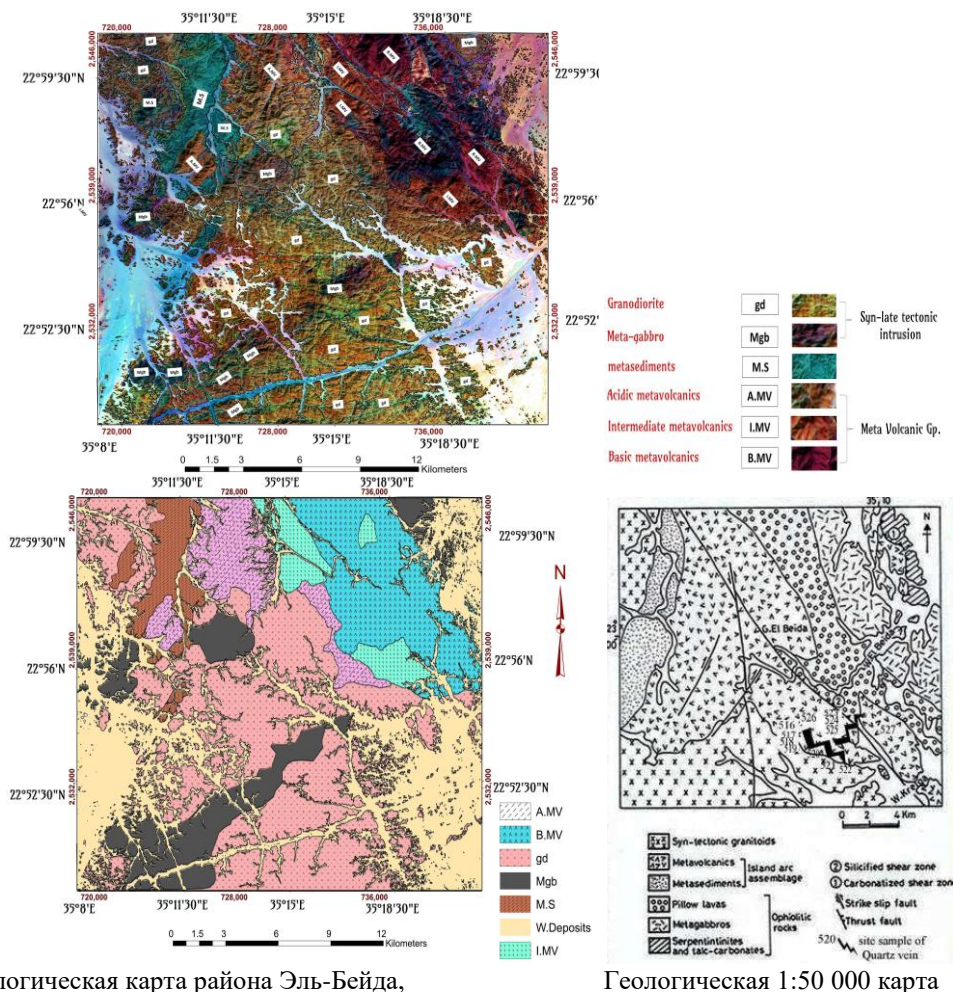


Рис. 40 Литологическая карта района Эль-Бейда,

Геологическая 1:50 000 карта

Картирование линеаментов.

ДДЗ района исследований обработаны с использованием краевых фильтров с целью выделения геологических (разломы, складки, зоны разломов) и топографических (хребты и участки дренирования) линеаментов. Картирование геологических линеаментов важно для разведки полезных ископаемых из-за их потенциала для контроля рудных тел, которые переносятся и отлагаются восходящими гидротермальными флюидами (рис. 41).

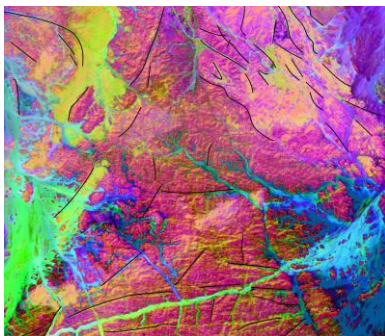


Рис. 41 Ручное извлечение линеаментов из PCA

Автоматическое картирование линеамента выполнялось модулем LINE программного обеспечения Geomatica на Multihilshade Landsat Oli 8 (рис. 42)

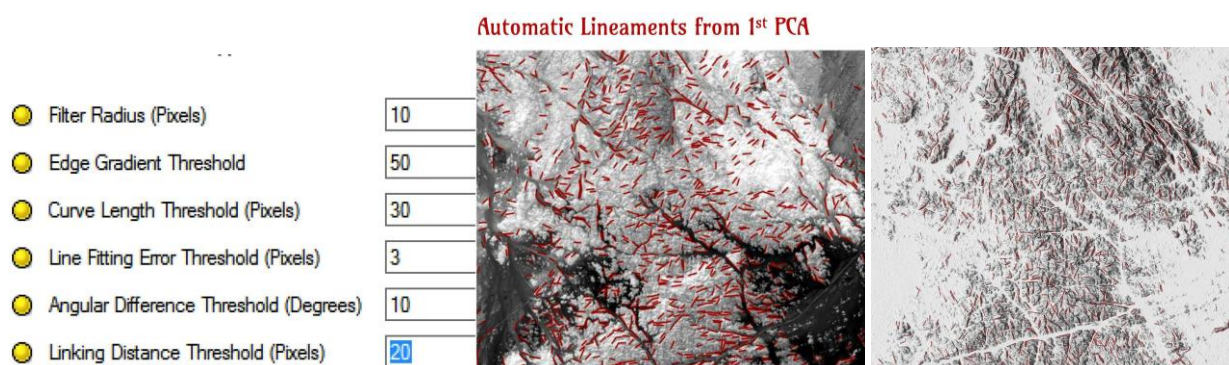


Рис. 42 Автоматизированные операции извлечения линеаментов (выбранные параметры)

Картирование гидротермально-метасоматических изменений пород.

Соотношение диапазонов 4/2 и 5/6 использовалось для картирования оксидов трехвалентного железа. Соотношение 6/7 использовалось из-за его способности картировать каолинит, монтмориллонит и глинистые минералы. Все эти особенности имеют высокий коэффициент отражения в канале 6 и низкий коэффициент отражения в канале 7 изображений Landsat 8 (рис. 43-45).

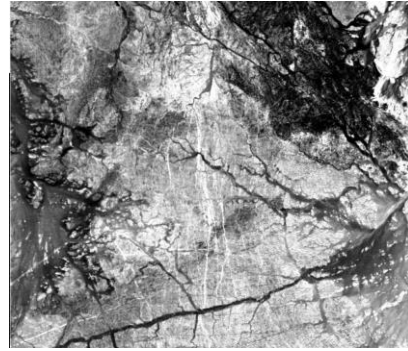
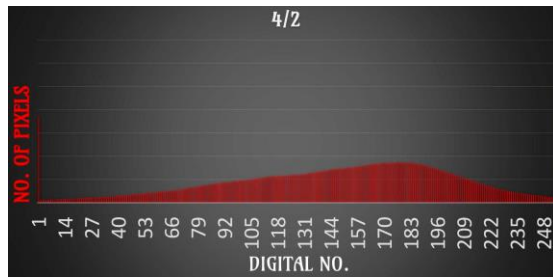


Рис. 43 Гистограмма для изображения 4/2 и изображение, полученное с соотношением каналов 4/2.

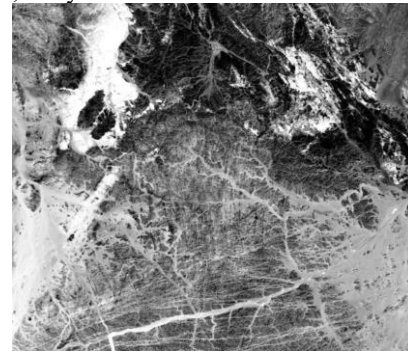
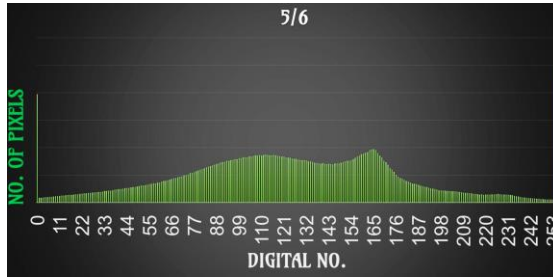


Рис. 44 Гистограмма для изображения 5/6 и изображение, полученное с соотношением каналов 5/6.

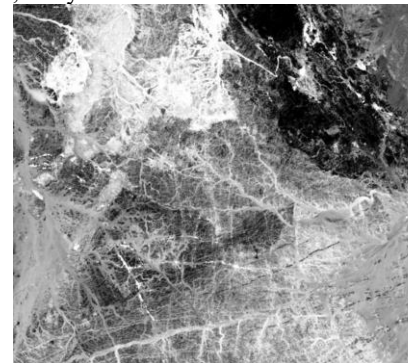
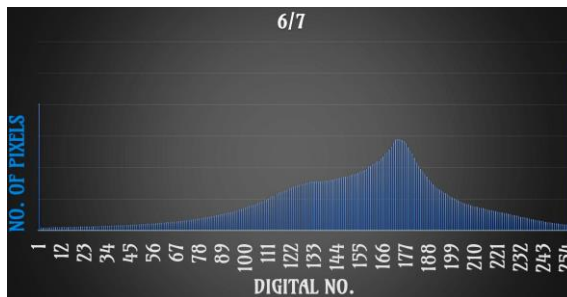


Рис. 45 Изображение, полученное с использованием соотношения каналов 6/7

Вариант среза цветовой плотности изображений соотношения каналов, в котором шкала серого заменена цветами, показанными на гистограмме пороговых аномалий для трех соотношений каналов оксидов железа и глинистых минералов. Цвета RGB соответствуют оксидам трехвалентного железа, оксидам двухвалентного железа и глинистым минералам (рис. 46, 47).

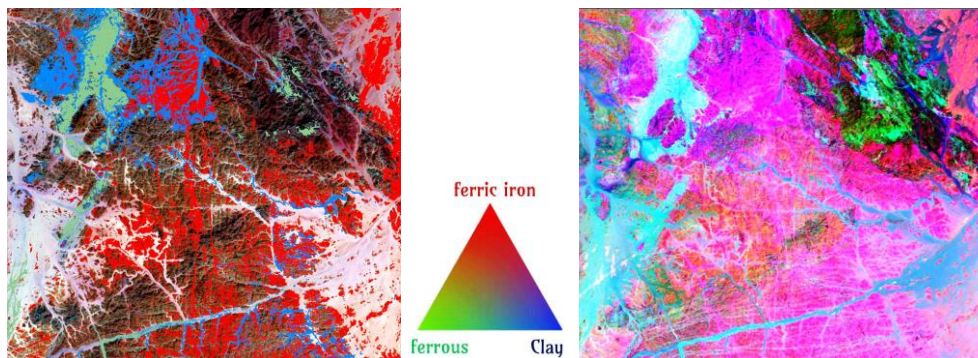


Рис. 46 Композитное сочетание цветов по соотношению полос Landsat 8 OLI.

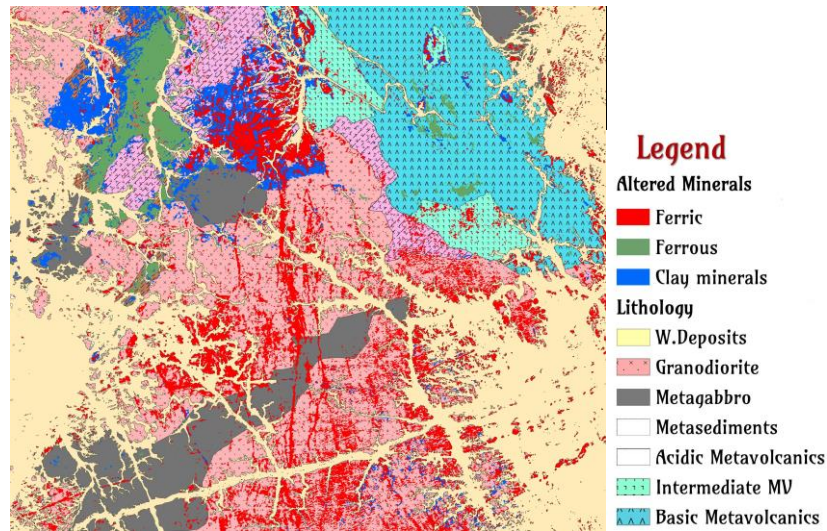


Рис. 47 Соотношение полос (BR) и изображение относительной глубины полосы (RBD)

False Color Composite (FCC (рис. 48)). Композиты ложных цветов (FCC) используются для выявления геологических особенностей при визуальном анализе. При использовании композитного метода ложных цветов необходимо выбрать до трех полос или изображений соотношения на основе известных характеристик поглощения минералов. Визуальный анализ обеспечивает руководство по выбору соответствующих комбинаций полос для более сложных алгоритмических процедур и дает некоторое предварительное представление о потенциальном успехе картирования выбранных литологий. Комбинации диапазонов ASTER каналов 7-3-1 в RGB используется в геологической интерпретации, основных геологических границ и наличии интрузивов. Кроме того, комбинации RGB 4/6-2/1-4/3 и 4/8-2/1-4/3, которые чувствительны к поглощению Fe и OH, используются для обнаружения различных минералов. Соотношение 4/8 важно для выделения связи Mg-OH биотита, хлорита, эпидота и амфиболов, которые могут присутствовать в различных процентах в вулканических и плутонических породах. Соотношение 4/6 - для обнаружения поглощения Al-OH каолинитом и другими глинистыми минералами, которые являются продуктами изменения калиевого полевого шпата и серицита. Отношения 2/1 и 4/3 - для полос поглощения Fe.

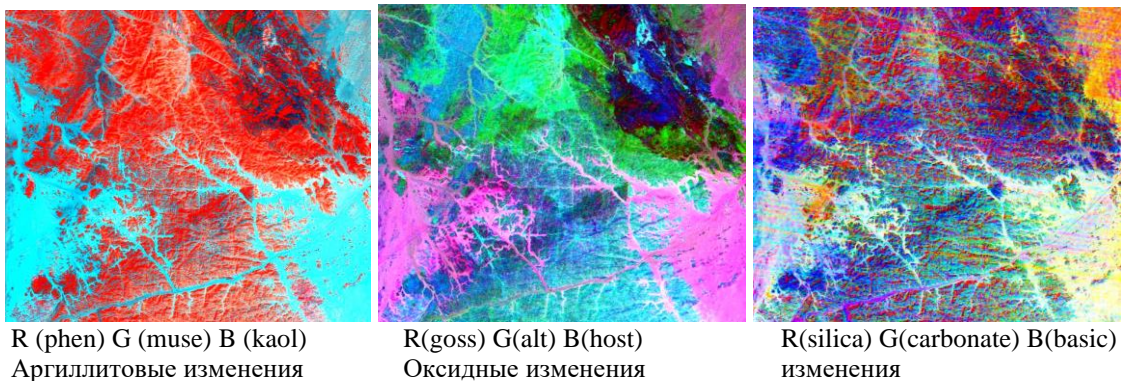


Рис. 48 Композиция ложного цвета Aster Image (FCC)

Анализ главных компонент — широко используемый метод повышения качества в различных исследованиях литологии и картирования гидротермальных изменений. Это быстрая, надежная методика, не требующая детального знания спектральных свойств конкретных целей, которую можно использовать со стандартным программным обеспечением. Она была применена для картирования гидротермальных минералов по изображениям Landsat TM и ASTER. Соответствующие изображения PCA могут отображать целевые типы земной поверхности, выделяя их как яркие или темные участки. Величина и знак (положительный или отрицательный) собственных векторных нагрузок являются показателями того, какие спектральные свойства поверхности материалов ответственны за отображаемую статистическую дисперсию.

PCA для Landsat OLI 8. Анализ PCA четырех полос OLI (2, 4, 5 и 6) был использован для картирования оксидов железа (изменение ожелезнения) (рис. 49). PC2 был отрицательным, поскольку полоса 4 имеет отрицательную нагрузку, а полоса 2 имеет положительную нагрузку. Картирование гидроксидов с помощью PCA на полосах OLI 2, 5, 6 и 7 предназначено для изучения собственного вектора нагрузки. PC2 был инвертирован, так как полоса 6 имеет отрицательную нагрузку, а полоса 7 имеет положительную нагрузку и умножает изображение PC2 со знаком минус. Поэтому аномальные пиксели, которые могут свидетельствовать о глинистых изменениях, во всех случаях самые яркие. Те же четыре полосы были использованы для картографирования ферромагнетических минералов, в то время как PC3 был отрицательным, поскольку полоса 6 имеет отрицательную нагрузку, а полоса 5 имеет положительную нагрузку.

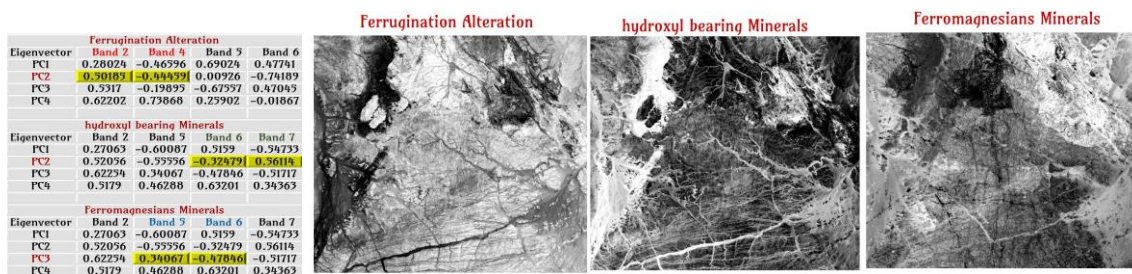


Рис. 49 Анализ PCA четырех полос Landsat OLI.

PCA для данных ASTER. Для того, чтобы получить изображения PCA с информацией об изменениях, необходим соответствующий выбор четырех полос. Были выбраны четыре полосы для выявления расширенных аргиллитовых изменений (алуниты, каолиниты), филлитовых изменений (серицит) и пропилитовых изменений (хлорит, эпидот) и кальцита (рис. 50).

Четыре изображения создаются путем проведения PCA с использованием каналов ASTER 1, 4, 6 и 7 для выявления расширенных аргиллитовых изменений (алунита, каолинита). Изображение PCA необходимо идентифицировать с особенностями

поглощения в 6 диапазонах собственных значений. Расширенное изображение аргиллитовых изменений имеет либо положительные собственные значения для полос 4 и 7 и отрицательное значение для полосы 6, либо наоборот.

Чтобы идентифицировать пропилитовые изменения (хлорит, эпидот) или кальцит, четыре изображения создаются путем проведения PCA с использованием каналов 1, 3, 5 и 8. Необходимо идентифицировать изображение PCA, имеющее характеристики поглощения в канале 8 в собственных значениях. Изображение с положительным собственным значением для канала 5 и отрицательным значением для канала 8 или наоборот.

Для идентификации филлических изменений (серицит) создаются четыре изображения путем проведения PCA с использованием каналов 1, 3, 5 и 6. Изображение PCA, имеющее особенности поглощения в полосе 6 в собственных значениях должны быть идентифицированы. Изображение PCA с положительным собственным значением для канала 5 и отрицательным значением для полосы 6 или наоборот.

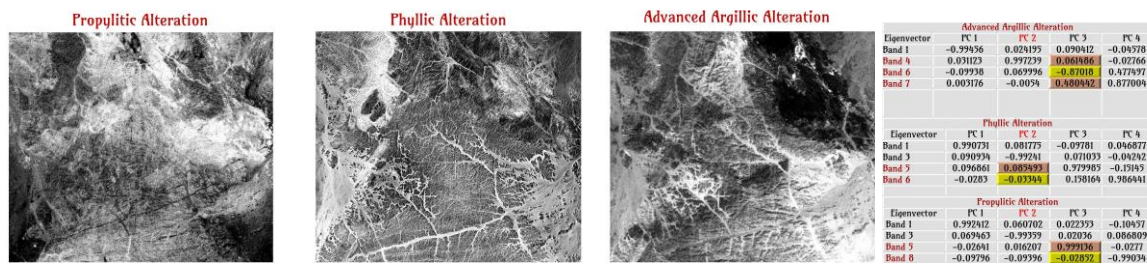


Рис. 50 Анализ PCA четырех полос ASTER.

Составное цветное изображение PCA. может использоваться для получения информации об изменениях, аналогично цветному составному изображению соотношения каналов ASTER, и обеспечивает дополнительный метод получения информации об изменениях и минералах.

Цветные составные изображения PCA, созданные по данным Landsat, способны более четко идентифицировать зоны изменений по сравнению с ложными изображениями. В цветном составном изображении Landsat PCA используется комбинация изображений оксида железа и изображений изменений (R:G:B = изображение изменения: изменение + оксид железа). изображение: изображение оксида железа). Но есть некоторые недостатки по сравнению с цветным составным изображением ASTER PCA: 1) необходима атмосферная коррекция данных Landsat для получения точного распределения оксида железа; 2) изменение, идентифицированное по данным Landsat, представляет собой в основном расширенные аргиллитовые изменения; 3) изменение идентифицируется без предоставления информации о зонах изменения.

Таким образом, цветное композитное изображение ASTER PCA является более практичным, чем цветное композитное изображение Landsat PCA (рис. 51)

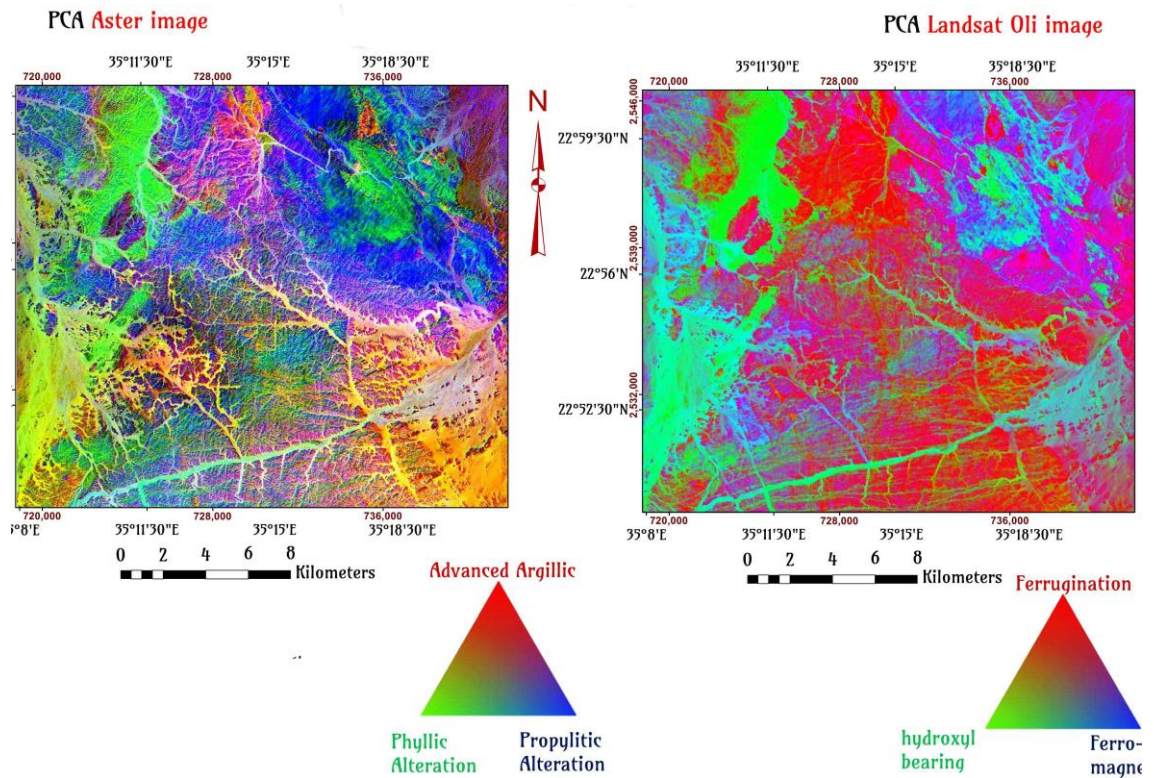


Рис. 51 Комбинация цветов от PCA

Выделение поисковых площадей.

Целью исследования являлось выделение новых площадей с высоким потенциалом эпитермальной золоторудной минерализации в определившемся рудном районе Эль-Бейда. В качестве наиболее перспективных были оконтурены участки интенсивного развития аргиллитовых гидротермально-метасоматических изменений пород преимущественно связанных с прогнозируемым типом оруденения (рис. 52)

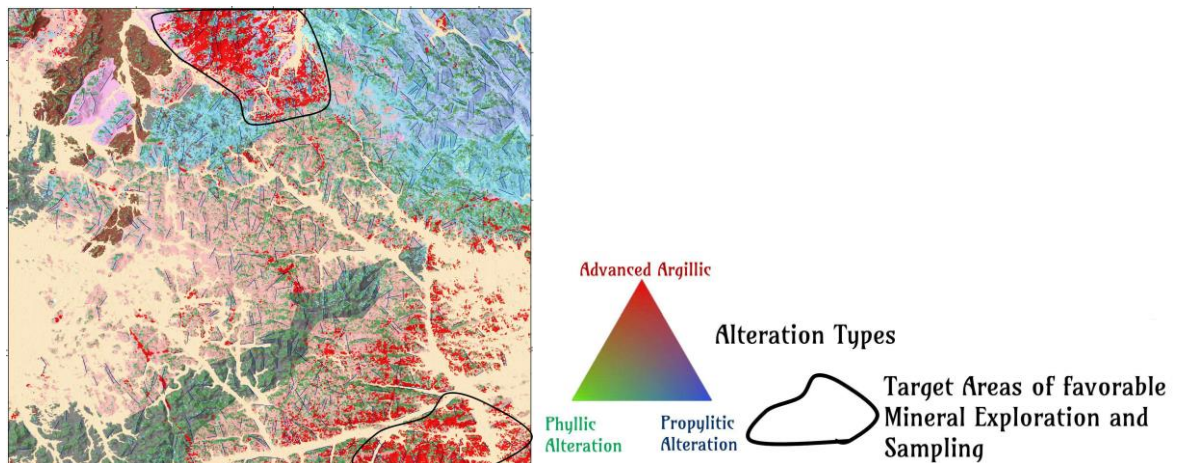


Рис. 52 Поисковые площади эпитермального (золотого) оруденения.

5.2 Анализ структурных факторов контроля золотого оруденения на основе ДДЗ (р-н Вади-Ходейн, Египет)

В Египте в Юго-Восточной пустыне был проведен структурный анализ на основе интерпретации ДДЗ. Была проверена эффективность обработки данных космической многоспектральной и радиолокационной съемок для геологического картирования, в частности, для выделения элементов, контролирующих распределение залежей золота.

Восточная пустыня Египта является частью Арабо–Нубийского щита (ANS), который состоит в основном из трех характерных тектоностратиграфических единиц: (1) инфракоровых гнейсов, локально обнажающихся в виде отдельных комплексов; (2) супракрустальных расчлененных офиолитов и вулканических/вулканосадочных комплексов островной дуги и (3) отложений молассы и известково-щелочных вулканитов. Широко распространенные гранитоидные интрузии разного возраста разрезают как инфракрустальные, так и супракрустальные породы. Юго–Восточная пустыня пережила историю наложения деформаций сжатия и транспрессии, проявляющихся в обширных северо-восточных наклонных надвигах, складках и транскуррентных разломах. Пояс сдвига Вади-Ходейн является крупной северо-ориентированной зоной поперечного сдвига в юго-восточной части пустыни (рис. 53).

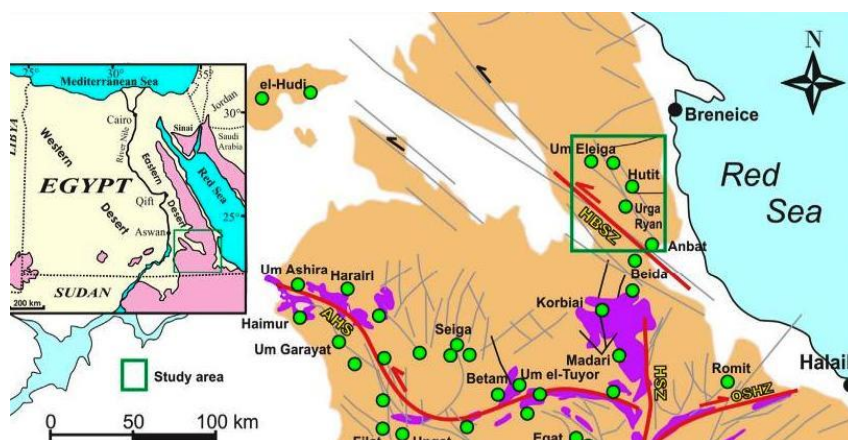


Рисунок 53. Распределение известных участков золотодобычи и месторождений золото-кварцевых жил относительно крупного разлома/сдвига, структуры и офиолитовые массы в террейне Ю-В пустыни

Предполагается, что на поздних стадиях транспрессии он имел до 300 км смещения.

Золотоносные кварцевые жилы и сопровождающие их зоны изменений встречаются в различных геологических и структурных условиях. Эти различные условия включают: (1) в зонах пластического сдвига на контактах между офиолитовыми и островодужными террейнами; (2) вдоль крутопадающих зон сдвига, охватывающих или разрезающих син- или позднерогенные гранитоидные интрузии; (3) в ассоциации с хрупко–пластичными зонами сдвига, отделяющими лиственизированный серпентинит от нижележащих последовательностей вулканогенно-пластических метаосаждений.

Структурный анализ, подкрепленный ДДЗ, был направлен на выявление факторов контроля распределения рассеянных золото–кварцевых жил в районе Вади-Ходейн. Мультисенсорные спутниковые данные были использованы для определения пространственной взаимосвязи между золотой минерализацией и структурами районного масштаба.

Неопротерозойские породы, обнаженные в поясе сдвига Ходейна, состоят из деформированных офиолитовых меланжевых пород, островодужных метавулканических и метавулканикластических последовательностей (рис. 54).

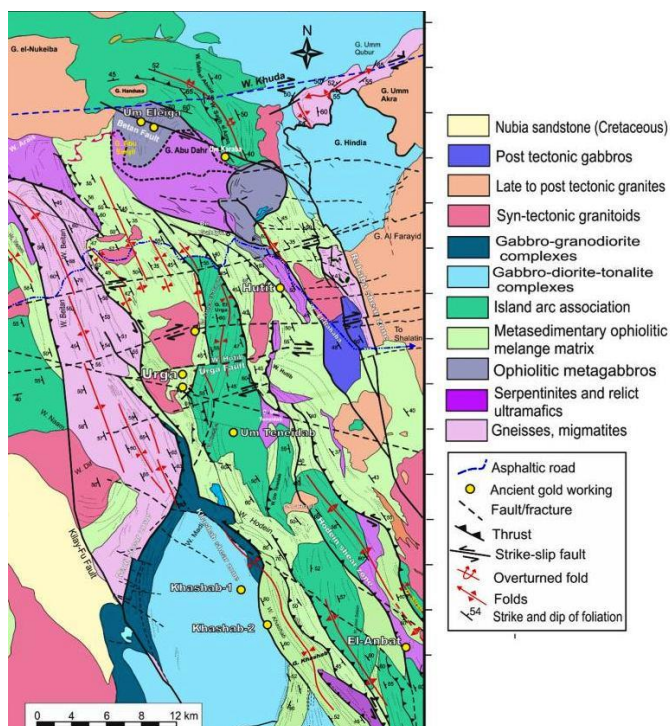


Рис. 54. Геологическая карта сдвигового пояса Вади-Ходейн-Бейтан

Эти породы перекрыты меловыми песчаниками (нубийским песчаником) и локально морскими турбидитами и карбонатами миоцена. Диоритовые и гранитные гнейсы и мигматиты обнажаются в западной части исследуемой территории. Контакт между поясом гнейсов и вулканогенно-пластическими породами определяется смещающимся надвигом, связанным с отдельными зонами милонитизированных гранитов.

Золотоносные кварцевые жилы прорезают сдвиговые метавулканиды, вулканогенно-пластические метаосаждения и габбро-диоритовый комплекс. Месторождения золота, образованные этими жилами, контролируются зонами сдвига северо-западного направления и сопровождаются обширными гидротермальными изменениями.

Литолого-структурное картирование.

Были использованы ДДЗ ASTER^{ast}, Landsat-8 OLI/TIRS и ALOS PALSAR. Методы обработки изображений включали комбинации полос (FCC), математика полос (BM), анализ главных компонент (PCA), декорреляционное растяжение. Минералогические

спектральные индексы были использованы при геологическом картировании зон гидротермальных изменений. Был применен многокритериальный подход при составлении карты потенциального золотого оруденения исследуемой территории.

Данные Landsat-8 OLI имеют более высокое радиометрическое разрешение (16 бит) и более низкое спектральное разрешение по сравнению с данными ASTER. Несколько изображений Landsat-8 OLI и ASTER band combinations были использованы для картирования литологических и структурных элементов. Комбинированные изображения Landsat-8 (RGB-753; рисунок 55а) и ASTER (RGB-431; рисунок 56а) различают различные литологические единицы и выделяют структурные элементы.

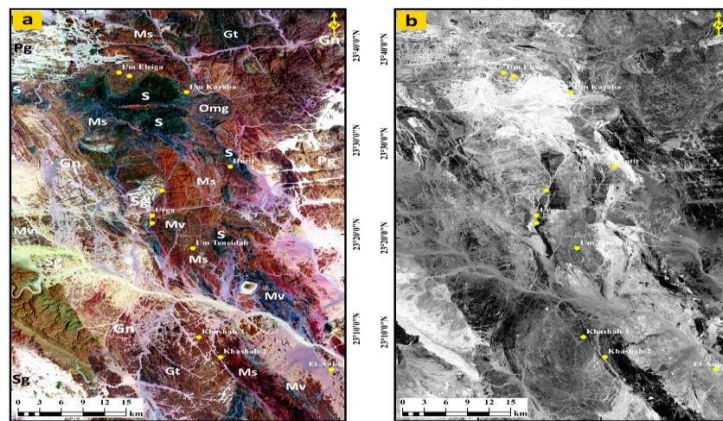


Рис. 55. Литологическая дискриминация с использованием (а) Landsat-8 (RGB-753) и (б) соотношения каналов Landsat-8 в шкале серого (6/7). (*Gn* = гнейсы и мигматиты, *S* = серпентиниты, *Omg* = офиолитовые метагаббро, *Ms* = метаосадочные офиолитовые матрикс меланжа, *Mv* = островодужная ассоциация, *Gt* = габбро-тоналит-гранодиоритовый комплекс, *Sg* = синтетектонические гранитоиды, *Pg* = посттектонические гранитоиды).

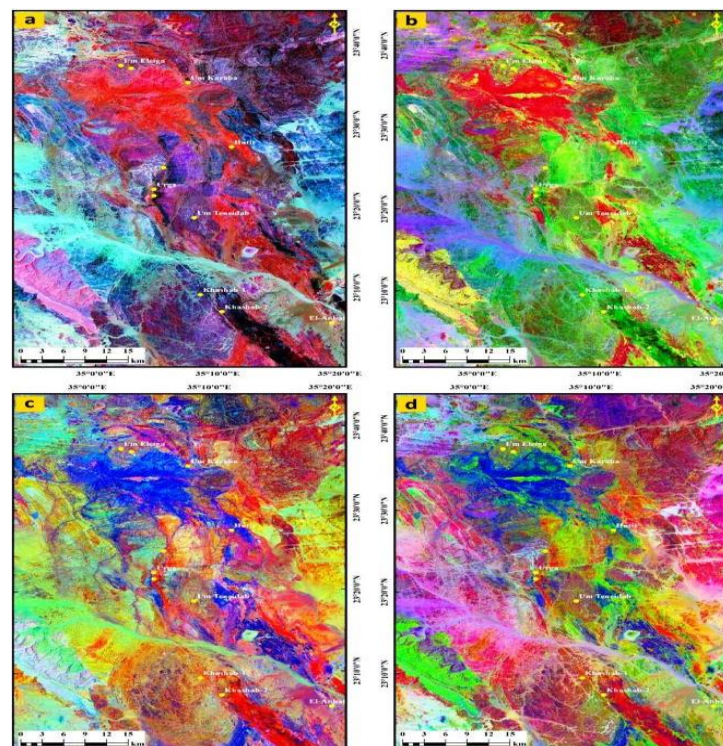


Рис. 56. Спектральная дискриминация офиолитов и связанных с ними пород с использованием обработанного Landsat-8. (а) Соотношение (RGB-6/7, 4/3, 5/4), (б) Соотношение (RGB-6/7, 6/5, 4/2) и (с) соотношение (RGB-7/5, 5/4, 6/7). (д) Оформление декорреляции до (7-6-5).

Офиолитовые породы выглядят как темно-зеленые пиксели, метавулканы и метаосадочные породы представлены темными или средне-коричневыми пикселями, в то время как сильно выветрившиеся гранитоиды и гнейсы имеют светло-коричневый цвет. Картируются разломы восточного, северо-западного и северо-восточного направлений.

Метод *band math*, который используется для уменьшения влияния топографии и усиления спектральных различий между полосами, делит цифровое числовое значение одной полосы на цифровое числовое значение другой. Математика полос полезна для выделения минералов гидротермального изменения, поскольку она сводит к минимуму различия в освещенности, вызванные топографическими особенностями. Математическое изображение диапазона Landsat-8 (6/7) было сгенерировано для картирования CO_2 и OH -содержащих минералов. Это соотношение изображений выделяет глинистые минералы, серпентин и многие зоны изменений в виде ярких пикселей, где метавулканические и метаосадочные породы проявляются серыми пикселями (рис. 55б). С другой стороны, серое изображение ASTER *band math* (7+9/8) представлено в виде индекса карбонат/хлорит. Он выделяет сильно расщепленные и карбонатизированные породы (серпентинит и тальк-карбонат) и метавулканические породы с яркой подписью изображения (рис. 56б). Офиолитовые габбро и метаосадочные породы выглядят как средне-серые пиксели, в то время как гнейсы и гранитоидные породы имеют черные спектральные сигнатуры. Это соотношение используется чтобы различать тальк-карбонатные и офиолитовые основные метавулканические породы в районе исследования.

Изображения с соотношением полос для усиления спектральных контрастов между полосами успешно использовались при картировании зон изменений. Landsat-8 FCC соотношения (RGB-6/7, 4/3, 5/4), соотношения (RGB-6/7, 6/5, 4/2) и соотношения (RGB-7/5, 5/4, 6/7) (рис. 56а–с) были получены для характеристики железооксидных, гидроксильных минералов, глинистых минералов и вмещающих пород. Изображение с коэффициентом (RGB-6/7, 4/3, 5/4) успешно выделило породы, богатые офиолитовым серпентинитом, которые обозначены ярко-красным цветом, а сильно тектонизированные метавулканические породы в виде фиолетовых и темно-синих пикселей (рис. 56а). Соотношение (RGB-6/7, 6/5, 4/2; рис. 56б) четко очерчивает серпентинитовые породы и их резкие контакты с окружающими метавулканико-метаосадочными ассоциациями и гранитоидами. Эти контакты считаются благоприятными местами локализации золотого оруденения. Серпентиниты выглядят как кроваво-красные пиксели, метаосадочные породы - темно-зеленые, в то время как метавулканы и кварц-карбонатные (листвениты) имеют ярко-зеленую окраску. Измененные глинистые минералы выглядят как оливково-зеленые пиксели. Скопление офиолитов выделяется ярким синим цветом, а кварц-карбонаты

(листвениты) - фиолетовыми пикселями в соотношении (RGB-7/5, 5/4, 6/7; рис. 56в). Метаосадочные породы характеризуются темно-голубым цветом, в то время как метавулканиды проявляются красновато-коричневыми пикселями. Эти отличительные спектральные сигнатуры характеризуют расслоенность сильно деформированных и тектонизированных пород.

Декорреляционное растяжение является важным методом улучшения изображения, который используется для улучшения визуальной интерпретации спутниковых изображений. Для полос, имеющих максимальную дисперсию, декорреляционное растяжение было применено к 7-6-5 полосам Landsat-8 (рис. 56г). Разломы северо-западного направления можно обнаружить по трем соотношениям изображений (рис. 56а-с). Темно-синие пиксели серпентинитов можно отличить от зеленовато-коричневых пикселей офиолитовых метагаббро. Метаосадочные породы и метавулканиды приобрели зеленовато-красный и ярко-зеленый цвета соответственно. Каолинит- и иллитсодержащие породы имеют ярко-красную подпись, в то время как гнейсовые и гранитоидные породы выглядят как светло-фиолетовые пиксели (рис. 56д).

Анализ главных компонент (PCA), как один из методов улучшения спектра, использовался для литологической дискриминации. Преобразование PCA было выполнено для диапазонов VNIR и SWIR Landsat-8 и ASTER для извлечения информации о литологических зонах и зонах изменений. Три изображения PCA (PC1, PC2 и PC3), содержащие наибольшую топографическую и спектральную информацию, признаны подходящими для литологической дискриминации. Изображения PCA могут содержать важную информацию, связанную с изменяющимися минералами, которая может быть отражена в загрузке собственных векторов полос поглощения и отражения. Когда нагрузка на собственный вектор является сильной (с положительным или отрицательным знаком) в полосах отражения и поглощения целевого минерала или группы минералов, улучшенные пиксели, относящиеся к минералу или группе минералов, будут проявляться как яркие пиксели, когда эта нагрузка положительна в полосе отражения; и наоборот, пиксели будут проявляться как темный, когда нагрузка отрицательна в полосе отражения.

В соответствии с анализом нагрузок собственных векторов семи полос Landsat-8 PCA получили цветные композитные изображения (RGB-PC2, PC1, PC4 и RGB-PC2, PC4, PC5; рис. 57а, б, соответственно). Полосы 2, 4, 5, 6, 7 Landsat-8 содержат ценную информацию для картирования оксидов железа и гидроксильсодержащих минералов. Породы, состоящие из минералов с высоким содержанием Al и/или Mg-OH (офиолитов), были лучше всего обозначены яркими лимонно-желтыми пикселями на рисунке 57а и желтовато-оранжевыми пикселями на рисунке 57б.

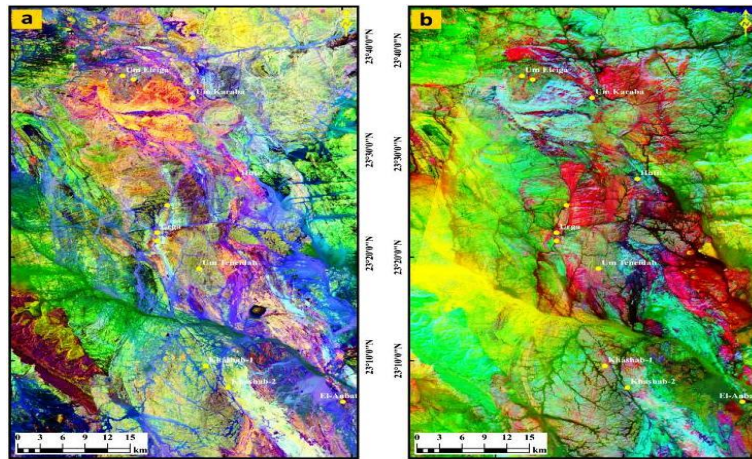


Рис. 57. Композитный анализ основных компонент (PCA) в ложных цветах (а) Landsat-8 RGB-PC2, ПК4, ПК5 и (б) ASTER RGB-ПК6, ПК3, ПК1.

Изображения подчеркивают контакт между кислыми и основными метавулканическими породами и вулканогенно-пластическими метаосадками и гнейсами. Участки с богато измененными минералами окрашены в голубые тона. На основе собственных векторных нагрузок девяти полос ASTER PCA были подготовлены цветные композитные изображения (RGB- PC1, PC2, PC3 и RGB-PC6, PC3, PC1; рис. 57а, б, соответственно). На рисунке 57б показаны ярко-пурпурные пиксели для минералов оксида/гидроксида железа, которые в основном связаны с офиолитовыми серпентинитами и метагаббро. Метаосадочные породы проявляются светло-пурпурными пикселями, метавулканиты - ярко-зелеными, а гнейсы и гранитоиды - голубыми. Рисунок 57б показывает метавулканические/метавулканиккластические породы в виде пикселей красноватого цвета. Светло-голубые домены цвета распространены в пределах офиолитовых меланжей, в то время как метаосаждения характеризуются травянисто-зелеными, а гнейсы и гранитоиды желтовато-зелеными пикселями.

Картирование линеаментов на основе ALOS PALSAR.

Данные PALSAR с высоким разрешением с полной поляризацией и переменным углом смещения от надира значительно улучшили структурное картирование и выделение линеаментов. Адаптивные фильтры Lee и Local Sigma могут быть применены к PALSAR для устранения пятен и улучшения выраженности линеаментов. Четыре сцены PALSAR были орторектифицированы и улучшены фильтром, чтобы проследить основные линейные структуры. Полосы HH, HV, HH+HV были преобразованы методом PCA в изображения PCA RGB (PC1, PC2, PC3; рис. 58а).

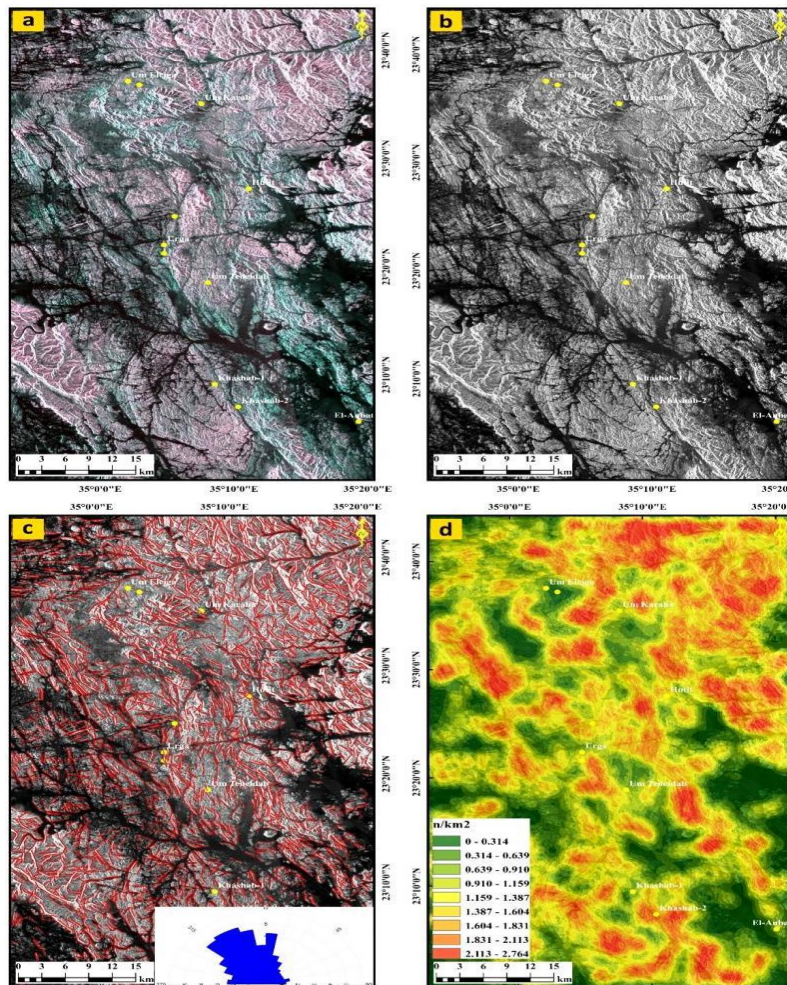


Рис. 58. Извлечение линеаментов с использованием обработанных данных PALSAR (а) PCA расширенного фильтра HH, HV, HH + HV в RGB-PC1, PC2, PC3, (б) PC1 выделяет особенности линеаментов, (с) извлеченные линеаменты, перенесенные на PC1 со вставкой азимутально-частотная диаграмма и (г) карта плотности линеаментов.

Автоматическое извлечение линеаментов было выполнено с использованием изображения PC1 (рис. 58б) с помощью линейного алгоритма PCI Geomatica software. Этот алгоритм принимается с параметрами, включая радиус фильтра в пикселях (RADI), порог градиента края (GTHR), порог длины кривой (LTHR), порог ошибки подгонки линии (FTHR), порог угловой разницы (ATHR) и порог расстояния соединения (DTHR).

Извлеченные линеаменты были наложены на изображение PC1 (рис. 58с) и экспортированы в программное обеспечение Rockworks для создания диаграммы азимут-частота (вставка, рис. 58с). Слой линеаментов был импортирован в среду ArcMap (версия 10.5, ESRI) для создания карты плотности линеаментов с использованием модуля плотности линий в spatial analyst toolbox (рис. 58д.). Результирующий слой линеаментов показывает преимущественно структурную зернистость в направлениях NW–SE, N–S и E–W, что в основном согласуется с основными надвигами и разломами. Также распознаются зоны расслоения и смещения сдвиговых разломов (рис. 58а, б). Участки золотого оруденения расположены вблизи зон высокой плотности линеаментов (рис. 58д).

Картирование зон гидротермальных изменений.

Коротковолновые инфракрасные (SWIR) каналы ASTER могут повысить точность спектральной идентификации минералов и пород. Индексы ASTER картируют зоны изменений с каолинитом, глинами, слюдами и карбонатами. Минералогические индексы представляют собой комбинации коэффициентов отражения двух или более спектральных полос. Шесть полос ASTER–SWIR были использованы для картирования минералов гидротермальных изменений. Для характеристики зоны изменений были использованы четыре спектрально-минералогических индекса: ОН несущий минеральный индекс, ОН1 индекс каолинита, KLI индекс кальцита, CLI хлорита и ALI алунита. ОН1 рассчитывается как $\frac{\text{полосы } 7/6 \times \text{полосы } 4/6}$, KLI - $\frac{\text{полосы } 4/5 \times \text{полосы } 8/6}$, CLI - $\frac{\text{полосы } 6/8 \times 9/8}$, ALI - $\frac{\text{полосы } 7/5 \times 7/8}$. Зоны гидротермальных изменений прослеживаются в виде ярких пикселей в сильно тектонизированных офиолитах, метаосадочных и островодужных метавулканических и метавулканикластических породах (рис. 59 а–d).

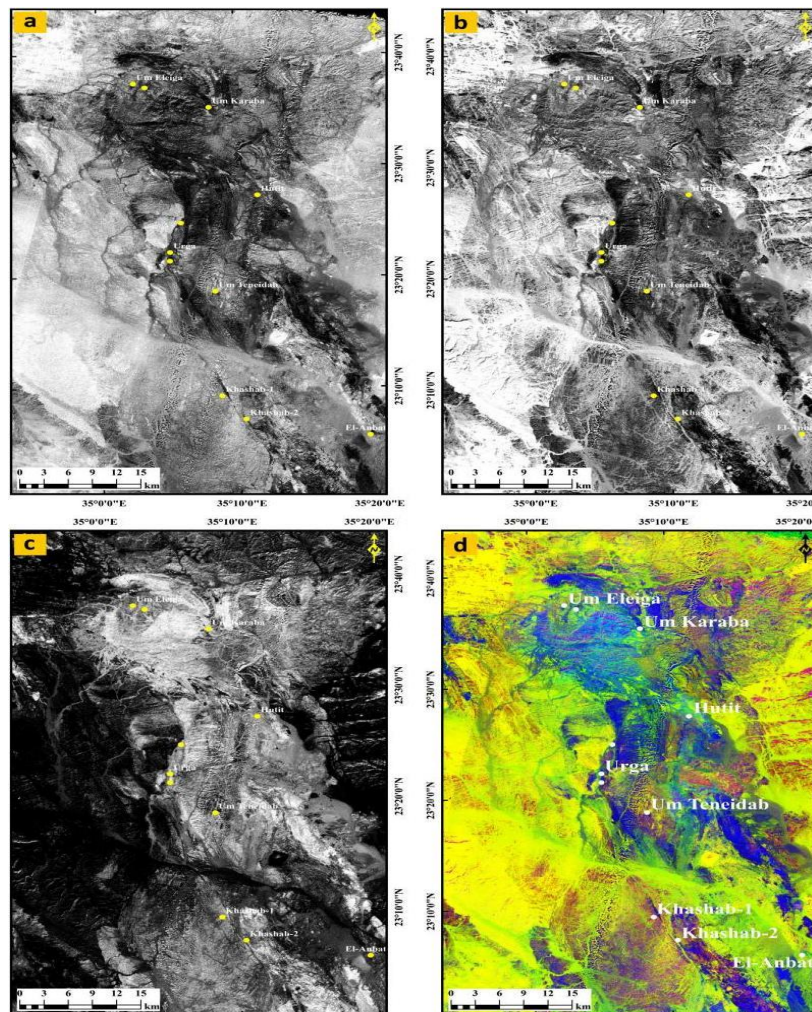


Рис. 59. Изображения соотношения каналов ASTER в оттенках серого, представляющие различные минеральные индексы (а) ОН1, (b) KLI, (c) CLI и (d) Fused FCC RGB-ОН1, KLI, CLI выделяет зоны изменений. (точками м-ния золота)

Породы островной дуги выглядят как яркие пиксели, вероятно, из-за обилия ОН-минералов, таких как слюда, амфиболы, хлорит и эпидот (рис. 59а). Богатые каолинитом и

глинистыми минералами породы, гранитоиды и измененные офиолитовые породы, показаны яркими пикселями на рисунке 59б. Изображение calcite index grey различает богатые кальцитом (серпентиниты, карбонаты, тальк) метавулканики островных дуг и сильно деформированные метаосадки в виде ярких и серых пикселей изображения.

Композитное изображение с ложноцветным соотношением (FCC) (OHI, KLI, CLI) было получено путем комбинирования трех изображений минералогических индексов в шкале серого в каналах RGB (рис. 59d). Это изображение характеризует ОН-несущие породы (мета-ультраосновные) как светло-голубые пиксели, метавулканики и метаосадки как темно-синие и красновато-синие пиксели соответственно. Богатые кварцем породы имеют красновато-желтую подпись изображения, в то время как глинистые минералы, содержащиеся в аллювиальных и др. отложениях, имеют лимонную и ярко-зеленую подписи. Зоны гидротермальных изменений связаны с зонами пластической деформации офиолитовых комплексов. Результаты картирования изменений, полученные на основе наборов данных ASTER, показывают пространственную связь этих деформаций с залежами золота.

Геопространственное моделирование золотого оруденения.

Дистанционное зондирование и ГИС были интегрированы для выявления перспективных участков на золотое оруденение. Для геопространственного моделирования слои доказательств были интегрированы в соответствии с их относительным вкладом. Рекомендуются три основных процесса для слоев доказательств: ранжирование, взвешивание и интеграция. Были получены, проанализированы и интегрированы наборы данных из нескольких источников для разработки геопространственной модели. Были подготовлены семь тематических карт, которые затем были преобразованы в растровую или векторную форму для легкой интеграции с инструментами ГИС. Каждому факторному слою был присвоен вес в соответствии с различными методами ранжирования (табл. 8).

Табл. 8. Веса, присвоенные различным параметрам золотого оруденения в районе исследования.

Thematic Layer	Class Ranges	Layer Weight	Influence (%)	Class Rank
Lithology map	Gn/Pgb/NSS/WD	0.38	38	1
	Sg/Pg			2
	Gt			3
	Ms/Mv			4
	S/Omg			5
Alteration Zone image (threshold)	Clay minerals	0.19	19	5
	OH-bearing rocks			4
	Calcite-bearing rocks			3
	Quartz-bearing rocks			2
	Sedimentary rocks			1
Proximity to gold mines (km)	<10	0.12	12	3
	10–20			2
Proximity to favorable contacts (km)	>20	0.10	10	1
	<2			3
Proximity to major faults (km)	2–10	0.08	8	2
	>10			1
Major faults density (km/km ²)	<1	0.07	7	3
	1–3			2
	>3			1
	0–0.28			1
	0.29–0.56			2
Lineaments density (km/km ²)	0.57–0.84	0.06	6	3
	0.85–1.12			4
	1.13–1.4			5
	0–0.55			1
	0.56–1.11			2
	1.12–1.66	0.06	6	3
	1.67–2.21			4
	2.22–2.76			5

Abbreviation: Gn = Gneisses and migmatites, S = Serpentinities, Omg = Ophiolitic metagabbros, Ms = Metasedimentary ophiolitic mélange matrix, Mv = Island arc association, Gt = gabbro-tonalite-granodiorite complex, Sg = Syn-tectonic granitoids, Pg = Post-tectonic granitoids, Pgb = Post-tectonic gabbros, NSS = Nubian Sandstone, WD = Wadi deposits.

Была рассчитана взвешенная сумма всех факторных слоев (рис. 59). Была составлена карта потенциала минерализации, на которой исследуемая территория была разделена на пять зон по степени перспективности (рис. 60).

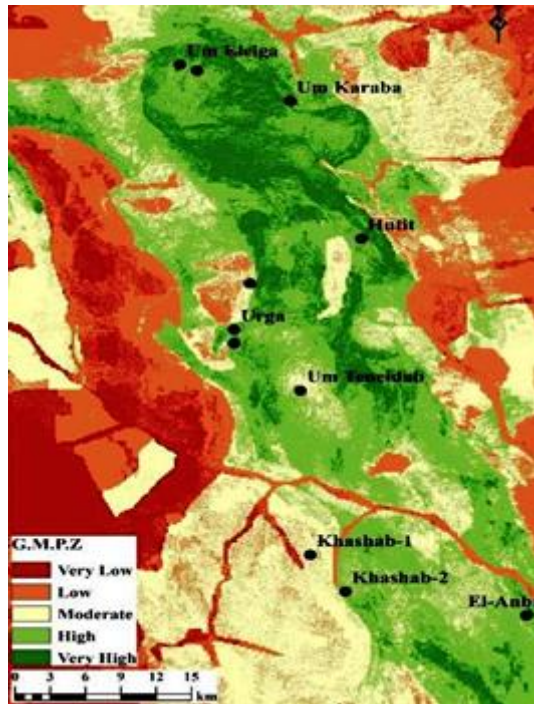


Рис. 60. Карта зон потенциального оруденения золота (G.M.P.Z) исследуемой территории.

Зоны с высоким потенциалом распределены в основном вокруг контактов офиолитовых, метавулканических и метаосадочных пород. Новые перспективные участки расположены рядом с уже известными участками добычи золота.

5.3 Использование данных ASTER при картировании гидротермально-метасоматических изменений (Ю-В пустыня, Египет)

В последние годы в Египте данные ASTER использовались для литологической идентификации и геологического картирования чехла и фундамента, для поисков месторождений золота, урана и редких металлов, а также для выявления зон гидротермально-метасоматических изменений пород.

Район исследований площадью около 1213 км² расположен на побережье Красного моря (рис. 61).

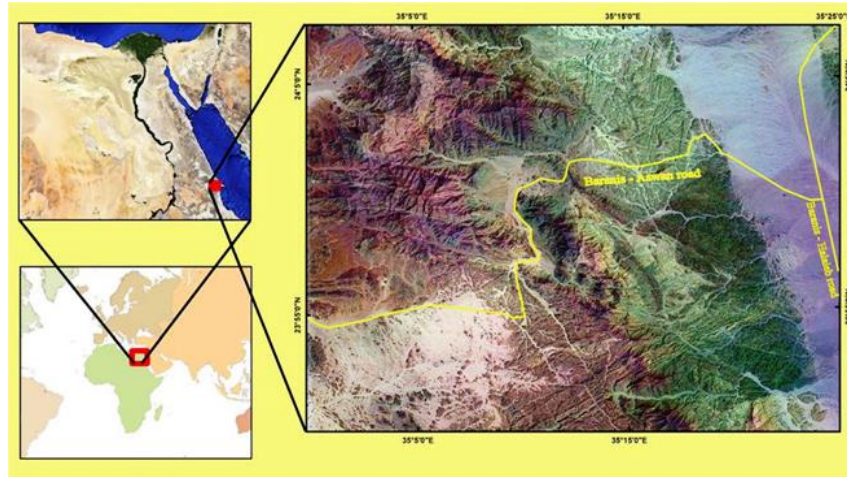


Рис.61 Схема расположения района исследований и его спектральный снимок.

Данные ASTER состоят из 15 зон, включая зону параллакса (зона 3В), необходимого для создания топографических карт и цифровых моделей рельефа. Топографическая карта района исследований, полученная на основе данных SRTM Worldwide Elevation Data (разрешение 1 угловая секунда), показана на рис. 62.

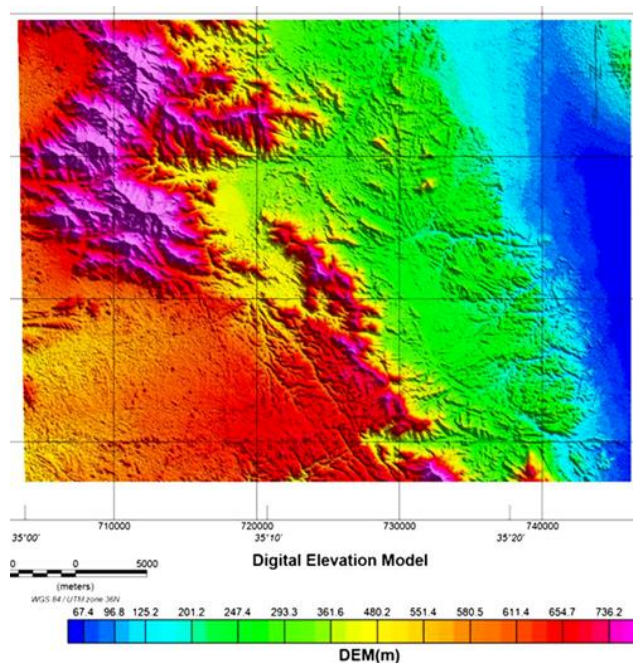


Рис. 62 Топографическая карта района по данным ASTER.

С привязкой GPS было собрано более 70 эталонных образцов горных пород, представляющих различные литологические различия в нескольких геолого-структурных обстановках (рис. 63).

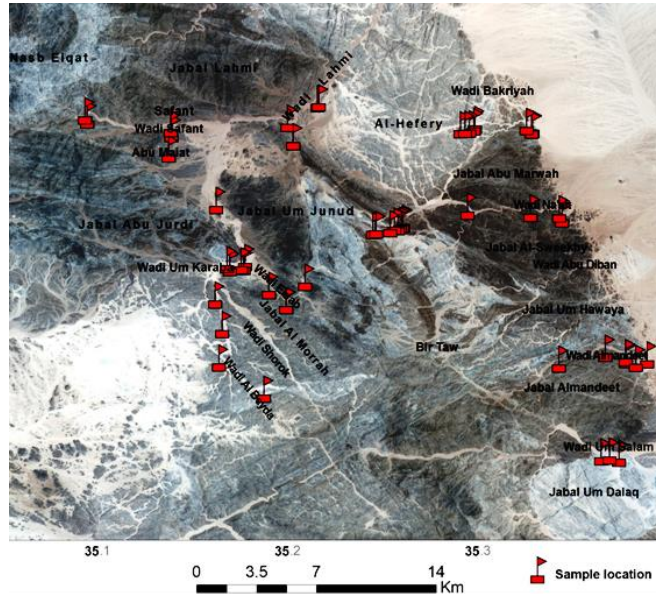


Рис. 63 Схема сбора эталонных образцов.

В настоящем исследовании данные ASTER использовались для геологического картирования различных объектов и их элементов, с акцентом на применение комбинации зон, их соотношения и декорреляции. Методология работ показана на (рис. 64).

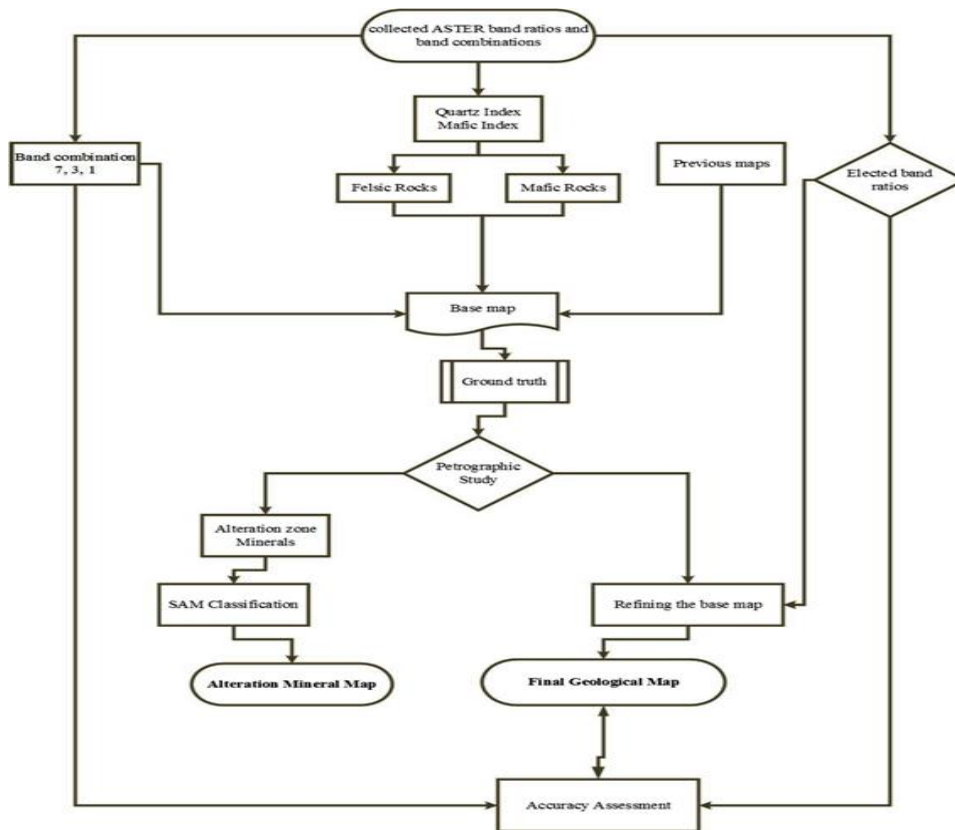


Рис. 64 Блок-схема методологии работ.

Для построения базовой карты в основном были использованы комбинации 7, 3, 1 диапазонов ASTER в RGB (рис. 65).

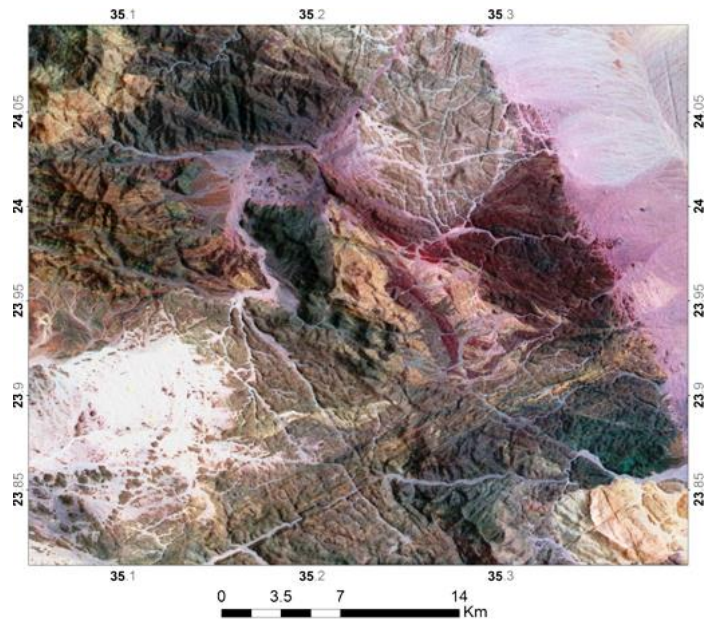


Рис.65 Ложно-цветное составное изображение комбинации 7, 3, 1 зон АСТЕР в RGB.

Вспомогательные изображения с другими соотношениями цветов показаны на рис. 74 а–е. Эти изображения использовались для выявления спектральных различий между зонами и уменьшения теневых эффектов, вызванных рельефом. Наиболее эффективные составные изображения для картирования магматических пород показаны на рис. 66, 67.

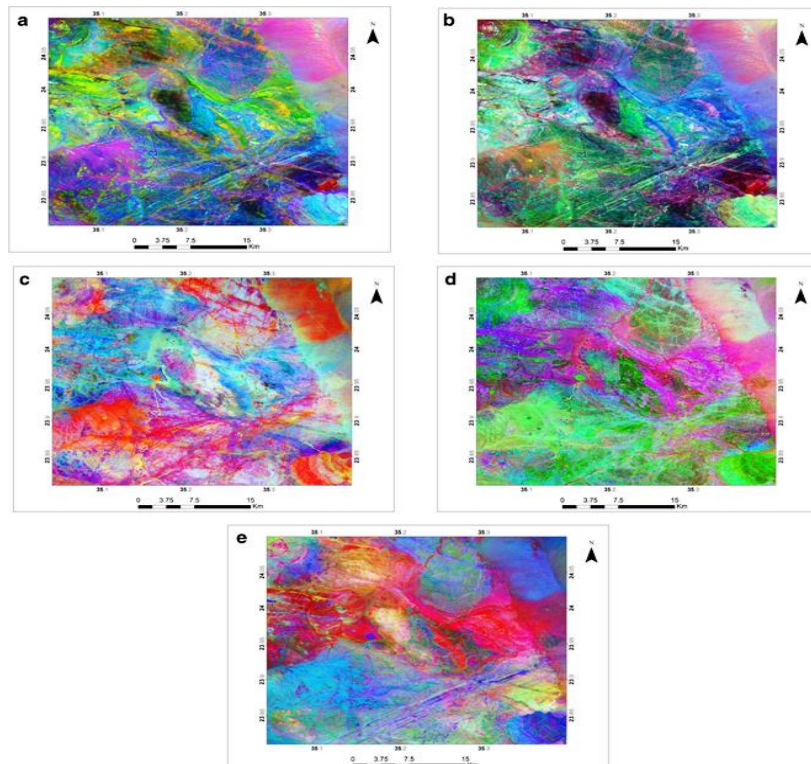


Рис. 66 Составные изображения: а-4/8, 4/2, 8/9; б-4/7, 4/1, 2/3, 4/3; в-7/6, 6/5, 6/4; д-(2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8; е-(1+3)/2, (3+5)/4, (5+7)/6

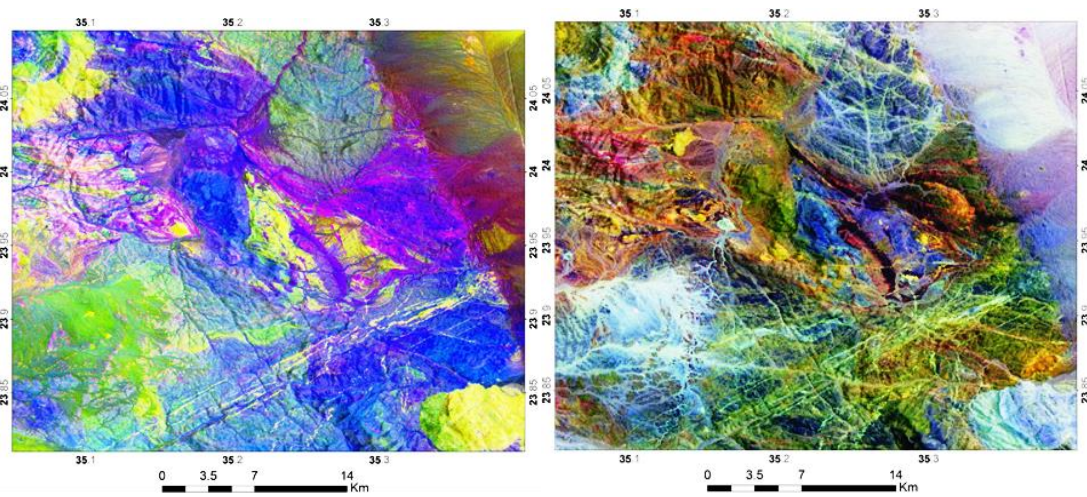


Рис. 67 Составные изображения с соотношением цветов 4/7, 4/6, 4/10.

Результирующая карта была создана путем применения порога, равного среднему значению пикселя на QI плюс стандартное отклонение значения пикселя на MI (рис. 68). Линейное усиление 14, 12, 10 данных по растяжению TIR-декорреляции RGB показывает разнообразие литологического состава поверхности, начиная от в основном синего цвета богатых кварцем гранитов до гнейсовидных гранодиоритов (коричневый цвет) (рис.69).

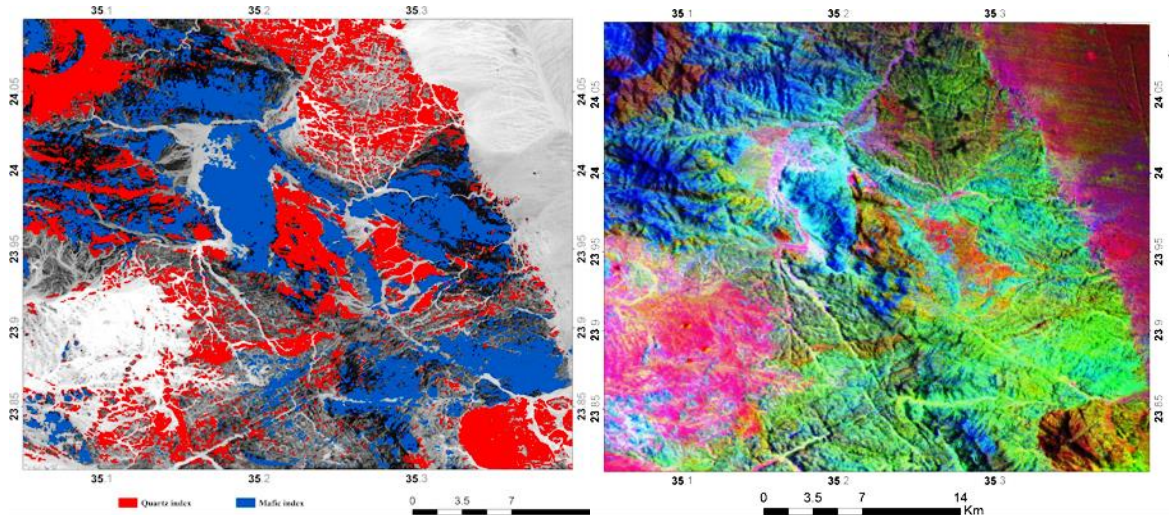


Рис.68,69 Схемы индексов с использованием порогового значения и типов гранитоидов.

Магматические породы района в хронологическом порядке от старых к молодым показаны в табл. 9.

Табл. 9 Разновозрастные магматические породы района

<ul style="list-style-type: none"> ● Rhyolite (locally microgranite; shear zone related) ● Dykes ● Perthitic leucogranite ● Biotite granite ● Tonalite ● Granodiorite with amphibolite Fragments ● Gneissose granitoids ● Metagabbro-Diorite Complex (locally deformed and metamorphosed) ● Sheared granites ● Amphibolites & Hornblende Quartz Schist ● Augen Gneisses 	<p>Youngest</p> <p>↓</p> <p>Oldest</p>
--	--

Разновидности и особенности магматических пород, выявленные на материалах АСТЕР, в коренных обнажениях показаны на фото 70-72.



Фото. 70 а - орто-гнейсы (AG) в чередовании с амфиболитом и гранитом (A/SG); б - микрофотография орто-гнейса; с - обнажение амфиболитов; d - чередование амфиболитов (Am) и гранитов (SG); е - общий вид гранитов; f – микрофотография милонитизации и катаклаза в граните; g - массивные метагабброиды.



Фото 71 а - общий вид основных даек, пересекающих метагаббро (MG); б - микрофотография оливина (Ol) в метагаббро; с - гнейсовидные гранитоиды; d - ксенолит амфиболита (Xn) в гнейсовидном граните; е -

микрофотография гнейсовидного гранодиорита; f - гранодиорит (Gd) с обломками амфиболита (AF),
 рассеченный дайкой основного состава.



Фото 72 а - обнажение тоналита; б - биотитовый гранит; с – микрофотография микроклина с перекрестной штриховкой, двойникование плагиоклаза и кварца; d - обнажение пертитового лейкогранита; е – сдвиговая зона в микрограните; f – микрофотография сферолитовой структуры риолита.

В результате проведенного анализа данных АСТЕР на основе объединения результатов составных изображений с ложными цветами, составных изображений с цветовым соотношением основных индексов и полевых исследований была построена геологическая карта района (рис. 73).

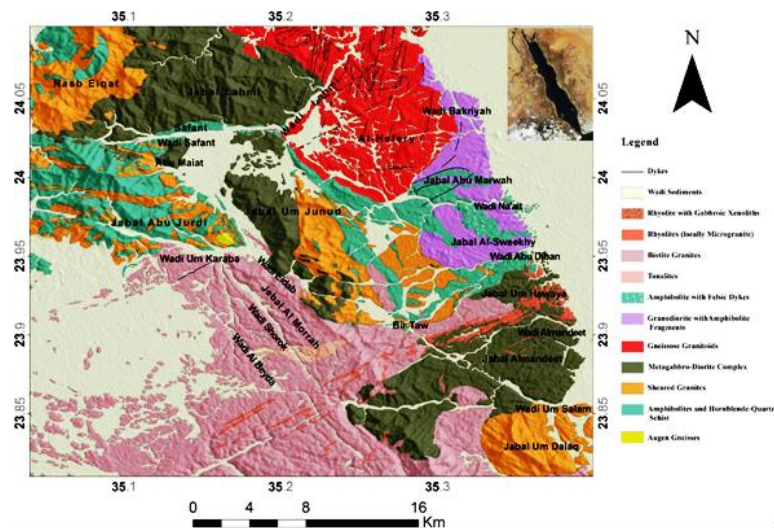


Рис. 73 Геологическая карта района работ.

На новой геологической карте наблюдаются дополнительные литологические единицы: включая орто-гнейсы, участки трещиноватых гранитов, гранодиориты с фрагментами амфиболитов, лейкограниты, риолиты и микрограниты. Этих элементов не было на ранее опубликованной карте района.

На основе полученных данных были проведены исследования возможности картирования по материалам АСТЕР гидротермально-метасоматических изменений пород, потенциально связанных с рудной минерализацией.

Минералы гидротермально-метасоматических изменений пород в районе в основном представлены каолинитом, хлоритом и эпидотом. Их спектральные характеристики из библиотеки Геологической службы США (рис. 74а) были сопоставлены с выборками спектральных данных АСТЕР района (рис. 74б). Применяемые максимальные углы для АСТЕР VNIR-SWIR перечислены в табл. 11. Они были выбраны в соответствии с полевыми определениями и использовались в качестве порогового спектрального угла для каждого минерала.

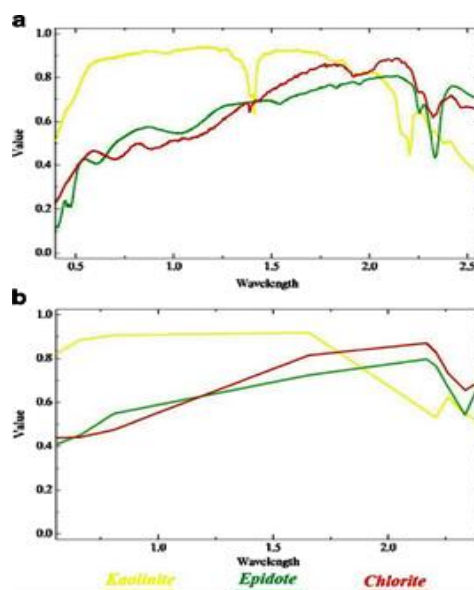


Рис. 74 а - спектральные данные выбранных минералов (каолинит, хлорит и эпидот) из спектральной библиотеки Геологической службы США; б - спектры конечных элементов, преобразованные в АСТЕР.

Табл. 10 Максимальные углы (радианы), используемые в SAM классификации для АСТЕР VNIR-SWIR

End member	Maximum angle (rad)
Chlorite	0.13
Kaolinite	0.30
Epidote	0.105

Классификация SAM с использованием эталона USGS успешно идентифицировала каолинит (желтый цвет), хлорит (красный цвет) и эпидот (зеленый цвет) (рис. 75).

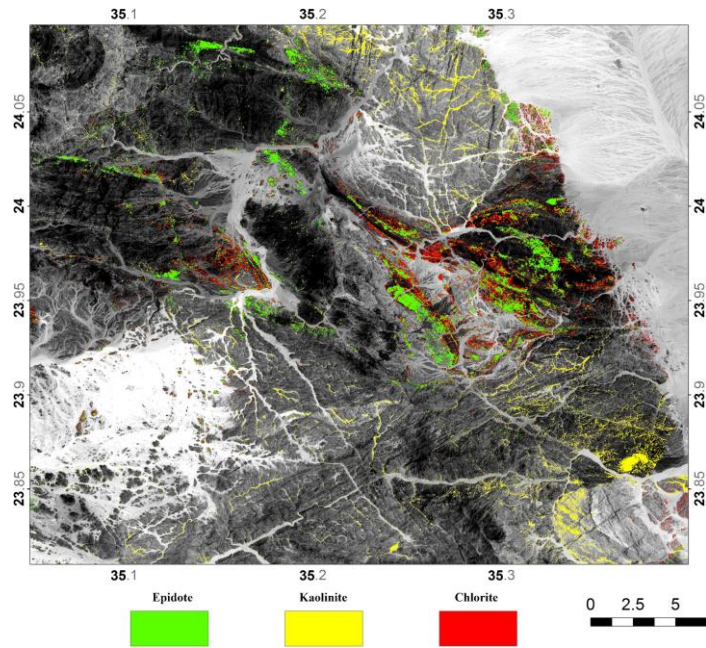


Рис. 75 Изображение полосы 1 ASTER с нанесенными зонами гидротермальных изменений: красным для хлорита, желтым для каолинита и зеленым для эпидота.

Для оценки достоверности полученных результатов был использована методика классификации максимального правдоподобия. Общая точность полученных изображений была оценена с использованием матрицы неточностей в программном обеспечении Envi (рис. 76, табл. 11-13).

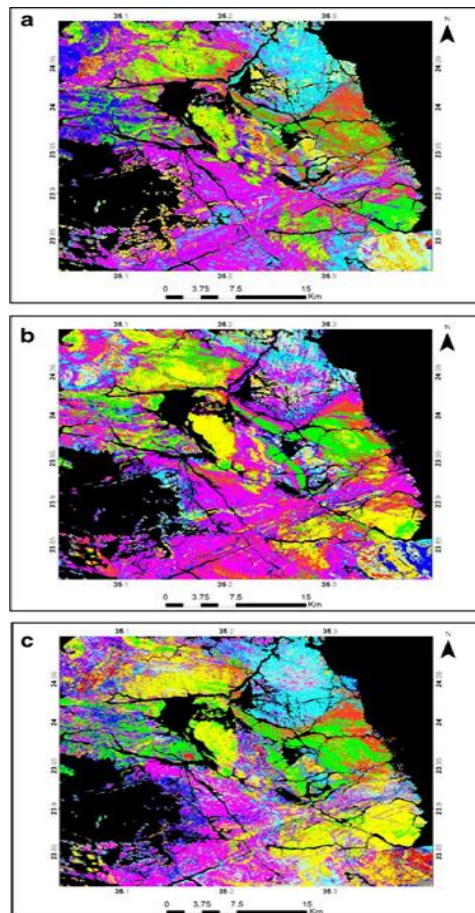


Рис. 76 Контролируемая классификация: а - для диапазонов 7, 3, 1; б - для соотношений зон 4/7, 4/6, 4/10; с - для соотношений полос 4/1, 3/1, 12/14.

Табл. 11 Матрица неточностей «коэффициент каппа» комбинации диапазонов 7, 3, 1

	S. granite	Meta gabbro	Gnciss	B. granite	Tonalite	Masked	Amphib.	A gnciss	Granodiorite	Am-felsic	Rhyolite	Sediments	Total
S. granite	0	21	0	2	0	0	0	3	0	0	14	0	40
Metagabbro	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87
Gnciss	0	0	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
B. granite	0	2	1	11	0	0	0	0	0	1	0	0	15
Tonalite	0	0	1	39	0	0	0	1	0	0	7	0	48
Masked	0	0	0	0	0	422	0	0	0	0	0	0	422
Amphibolite	0	1	0	0	0	0	111	00	3	0	0	0	115
A gnciss	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	55
Granodiorite	0	0	0	0	0	0	1	0	22	32	0	0	55
Am-felsic	0	244	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	252
Rhyolite	30	0	3	15	18	0	0	5	0	0	0	0	71
Sediments	45	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	68	129
Total	75	355	104	67	34	422	112	64	26	40	21	68	1388

Общая точность = (882/1388) 63,5447%, коэффициент Каппа = 0,5778

Табл. 12 Матрица неточностей коэффициент «каппа» соотношение полос 4/7, 4/6, 4/10

	S. granite	Meta gabbro	Gnciss	B. granite	Tonalite	Masked	Amphib.	A gnciss	Granodiorite	Am-felsic	Rhyolite	Sediments	Total
S. granite	2	0	2	34	0	0	17	0	0	0	0	0	55
Metagabbro	0	340	0	0	0	0	0	0	4	21	0	0	365
Gnciss	1	0	70	15	0	0	0	2	0	0	4	0	92
B. granite	0	0	0	18	0	0	0	0	0	1	0	0	19
Tonalite	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Masked	0	0	0	0	0	422	0	0	0	0	0	0	422
Amphibolite	0	0	0	0	0	0	89	0	5	18	0	0	112
A gnciss	12	0	0	0	13	0	0	55	0	0	0	0	80
Granodiorite	0	3	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	20
Am-felsic	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Rhyolite	4	0	6	0	9	0	0	7	0	0	17	7	50
Sediments	56	0	0	0	12	0	6	0	0	0	0	61	135
Total	75	355	104	67	34	422	112	64	26	40	21	68	1388

Общая точность = (1091/1388) 78,6023%, коэффициент Каппа = 0,7381

Табл. 13 Матрица неточностей коэффициент «каппа» соотношение полос 4/1, 3/1, 12/14

	S. granite	Meta gabbro	Gnciss	B. granite	Tonalite	Masked	Amphib.	A gnciss	Granodiorite	Am-felsic	Rhyolite	Sediments	Total
S. granite	38	0	0	0	5	0	0	1	0	0	11	0	55
Metagabbro	0	328	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	334
Gnciss	0	0	100	13	0	0	0	0	0	0	0	5	118
B. granite	0	25	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	30
Tonalite	8	0	0	4	10	0	0	0	0	0	4	0	26
Masked	0	0	0	0	0	422	0	0	0	0	0	0	422
Amphibolite	0	1	0	0	0	0	89	0	0	1	0	0	91
A gnciss	4	0	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	67
Granodiorite	0	0	0	0	0	0	0	0	26	1	0	0	27
Am-felsic	0	1	0	0	0	0	23	0	0	32	0	0	56
Rhyolite	25	0	0	46	19	0	0	0	0	0	5	0	95
Sediments	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	63	67
Total	75	355	104	67	34	422	112	64	26	40	21	68	1388

Общая точность = (1180/1388) 85,0144%, коэффициент каппа = 0,8180

Анализ комплексных ДДЗ, геологических полевых и петрографических исследований обеспечивает надежное с высоким разрешением литологическое картирование неопротерозойских магматических пород, Применяемые методики анализа включают составные изображения в искусственных цветах, с соотношением цветов, литологические

индексы ASTER-TIR, растяжение декорреляции и картографирование спектральных углов (SAM).

Каолинит, хлорит и эпидот – доминирующие минералы гидротермальных изменений. Используя устройство отображения спектрального угла (SAM) в качестве контролируемого метода классификации, а также эталонные спектры удалось картировать зоны изменений пород в исследуемом районе.

5.4 Использование гибридной модели Fuzzy-АНР ДДЗ для выявления зон гидротермальных изменений, связанных с медно-порфировыми системами (р-н Симорг, Иран)

В районе Симорг развиты андезит и андезит-дацитовые вулканические образования, прорванные гипабиссальными интрузиями гранитоидов с порфировыми текстурами (рис. 76б).

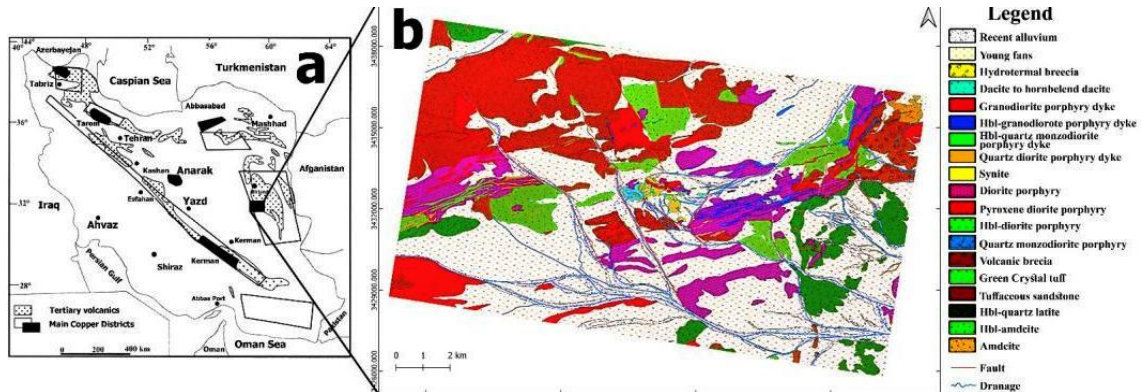


Рис. 76. (а) Географическое положение р-на Симорг в Иране; (б) Геологическая карта р-на Симорг

Целью исследования являлось использование ДДЗ тепловых эмиссионных и отражательных радиометров ASTER для поисков м-ний порфировой меди. Задачами этого исследования являлись:

1. идентифицировать зоны глинистых, филлитовых и пропилитовых гидротермальных изменений, связанных с медно-порфировыми системами, используя методики анализа данных ASTER, в том числе - ложных цветов (FCC), соотношение полос (BR), анализ основных компонентов (PCA) и минимальную долю шума (MNF);
2. интегрировать тематические слои, извлеченные из FCC, BR, PCA и MNF, с использованием гибридной модели Fuzzy-АНР;
3. создать карту потенциала порфировой меди для исследуемого р-на.

Территория Симорга на востоке Ирана составляет $\sim 40 \text{ км}^2$. С точки зрения геоморфологии исследуемый район характеризуется эрозионно-денудационным рельефом лишенным растительности.

В геологическом строении р-на участвуют: (1) Пирокластические и вулканические образования, включающие зеленые и коричневые туфы и вулканические брекчии; (2) Порфировые монзониты и диориты; (3) Дайки порфировых гранодиоритов и сиенитов; (4) Риолитовые вулканические образования с сульфидной минерализацией; (5) Гидротермальные брекчии площадью $\sim 500 \times 500 \text{ м}$ в центральной части р-на.

В исследовании использовались изображения ASTER (без облаков) уровень 1В, которые были предварительно обработаны методиками подмножества сцен, перекрестных помех и атмосферного спектрального анализа в прямой видимости (FLAASH). Коррекция

перекрестных помех была выполнена для устранения эффектов просачивания энергии из полосы 4 в полосы 5 и 9, а FLAASH был выполнен для коррекции атмосферных эффектов.

Аналитический иерархический процесс (АИП) - это способ помочь в принятии решений, который подчеркивает важность лица, принимающего решения, а также ценность сравнения альтернативных вариантов в процессе принятия решений. Этот метод является одним из популярных методов определения потенциальных площадей путем объединения информационных слоев при поисках полезных ископаемых. Одним из его преимуществ является приоритизация каждого слоя и их взвешивание. Эти веса могут обеспечить отображение после применения к нечетким слоям. Учитывая, что вероятность минерализации во всем р-не колеблется от 0 до 100%, этот метод называется Fuzzy-АИП. Нечеткие карты показывают минеральные аномалии, основанные на вероятности минерализации. На самом деле, это преимущество при разведке полезных ископаемых, потому что нечеткие аномальные области отмечены с определенной степенью вероятности. Из-за наличия медно-порфировых руд, изменений и минеральных индексов эти слои могут быть использованы для принятия эффективных решений.

Для создания карты минерального потенциала исследуемой территории информационные слои, полученные из FCC, BR, PCA и MNF, были объединены с использованием нечеткой модели АИП. Таким образом, что после фазификации слоев в матрице выполняются сравнения веса два на два. А затем, используя модель АИП, карты объединяются. Эта модель включает в себя следующие 4 шага:

- (1) Определение критериев и подкритериев для использования в модели.
- (2) Определение веса критериев и подкритериев с использованием модели АИП.
- (3) Фазификация информационных слоев с использованием нечеткой логики.
- (4) Интеграция размытых слоев с использованием весов, рассчитанных на шаге 2.

Все слои, использованные в этом исследовании, были интегрированы с помощью метода Fuzzy-АИП, этапы этого метода представлены на рисунке 77. На этом рисунке показаны основные критерии и методы, используемые для получения каждого из информационных уровней.

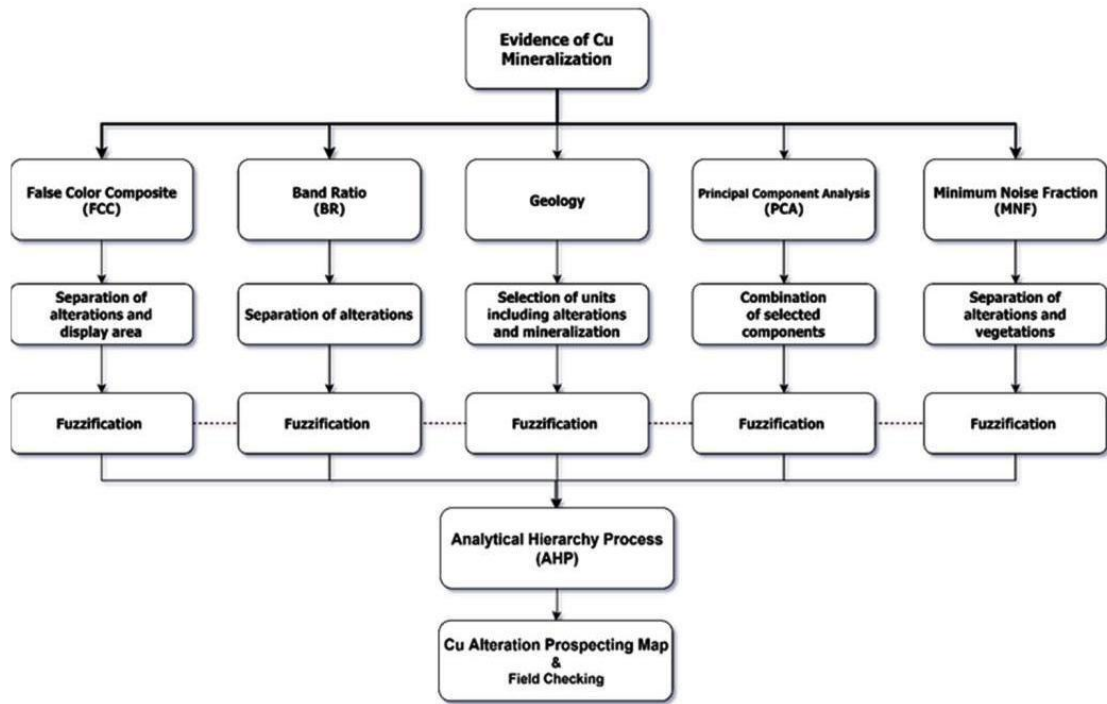


Рисунок 77. Иерархическая структура для моделирования потенциала медного оруденения в Симоргском р-не.

Ложная цветовая комбинация (FCC). Чтобы обнаружить зоны пропилитовых и филлических изменений в исследуемой области, полосы 4, 6 и 8 были использованы для получения красных (4), зеленых (6) и синих (8) цветовых комбинаций соответственно (рис. 78).

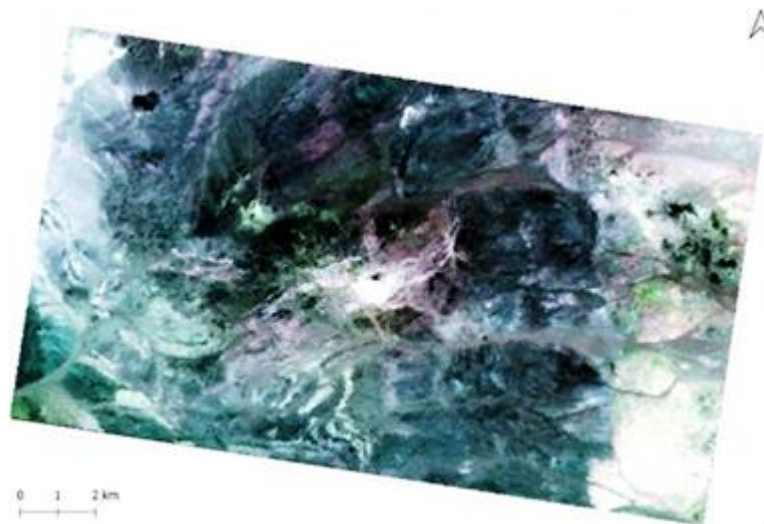


Рис. 78. Комбинация цветов RGB для полос 4, 6 и 8 для обнаружения пропилитовых и филлических изменений. Зона пропилитовых изменений окрашена в зеленый цвет, а филлитовых — в цвет от розового до желтого.

На изображении-карте зона пропилитовых изменений (с большим количеством минералов, содержащих Fe, Mg-OH) наблюдается зеленым цветом, а зона филлических изменений (с большим количеством минералов, содержащих Al-OH) наблюдается от розового до желтого цвета. Это связано с большим отражением минералов Al-OH (алунита, каолинита и мусковита) в диапазоне полосы 4 по сравнению с полосами 6 и 8. Многие

участки недавнего аллювия имеют белый цвет из-за большого количества глинистых минералов. С другой стороны, основные и промежуточные литологии, такие как пироксен-диорит-порфир, сиенит и диорит-порфир, проявляются от зеленого до черного цвета из-за большого количества основных минералов (хлорита и эпидота) в их содержании.

Соотношения полос 5/6 и 8/9 обладают большой способностью обнаруживать минералы с Al–Si–(OH) составом, такие как каолинит (аргиллитовая зона), и Mg–Si–(OH), такие как хлорит и эпидот (пропилитовая зона), соответственно. Соотношение полос 7/6 имеет высокий потенциал для выявления богатой мусковитом зоны. Мусковитовая минерализация может рассматриваться как индикатор зоны филлических изменений, которая является зоной с высоким потенциалом медно-порфирового оруденения. Цветовая комбинация RGB 7/6, 5/6 и 8/9 (R: 7/6, G: 5/6, B: 8/9) была разработана для отображения филлических, глинистых и пропилитовых зон в исследуемой области. Филлиновая зона (с высоким потенциалом) представлена желтым или красновато-желтым цветом, глинистая зона изображена зеленым цветом, а пропилитовая зона обычно отображается синим цветом вокруг других зон изменения (рис. 79). Метод соотношения полос специально идентифицировал зоны изменения по сравнению с методом FCC.

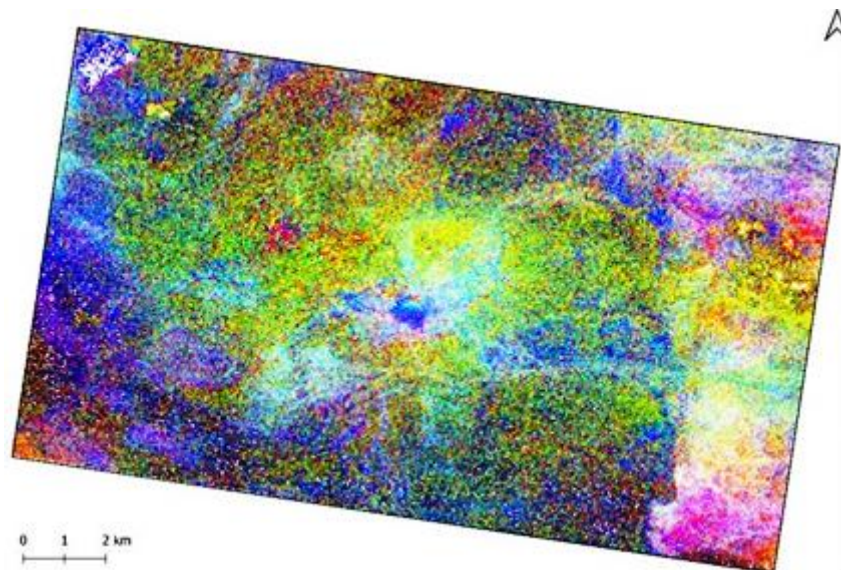


Рис. 79. Комбинация цветов RGB 7/6, 5/6 и 8/9 (R: 7/6, G: 5/6, B: 8/9)

Анализ главных компонент (PCA) был выполнен с использованием ковариационной матрицы на девяти полосах изображения ASTER, охватывающих исследуемую область. Результирующая матрица собственных векторов содержит спектральную информацию о цели, показывает самые высокие нагрузки на собственные векторы из полос ASTER, совпадающие с большинством диагностических характеристик цели, но с противоположными знаками (+ или –). Компонент 1 (PC1) содержит положительные коэффициенты всех девяти полос VNIR и SWIR и, благодаря своему специфическому значению, покрывает 91,6% от общей дисперсии изображения. Общая яркость изображения

создает сильную корреляцию между полосами. В настоящем анализе эта общая яркость полностью обнаруживается в первом компоненте (PC1). Растительность обладает высокой отражательной способностью и поглощением в полосах 3 и 2 соответственно. Наибольшая разница в нагрузке среди упомянутых полос наблюдается в PC4, и, следовательно, растительность находится в PC4 (рис. 80a). Низкий процент изменчивости этого компонента (0,94) указывает на дисперсию растительности на исследуемой территории.

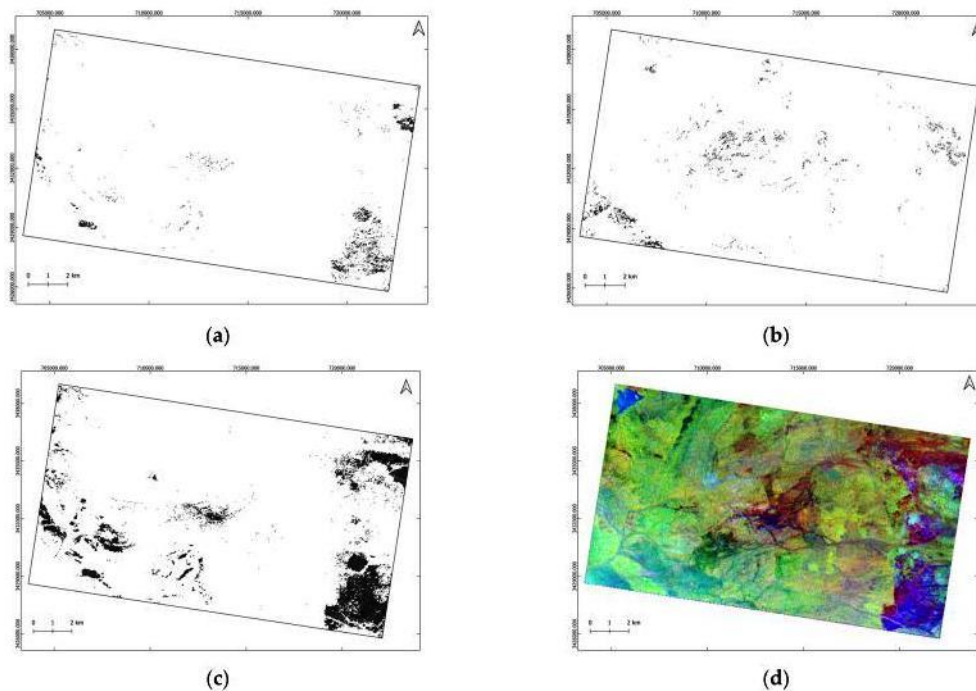


Рис. 80. (а) изображение ПК4, (б) изображение ПК5, (в) изображение ПК7 (целевые области представлены черными пикселями), (d) Комбинация цветов RGB PC4, PC5, PC7 (пороговые значения были установлены на 0,28, 0,33 и 0,42 для ПК4, ПК5 и ПК7 соответственно).

Оксиды железа обладают наибольшим поглощением в полосах 1 и 2 ASTER, в то время как они демонстрируют высокое отражение в полосе 4. В PC4 собственные векторы, относящиеся к полосам 2 и 4, имеют нагрузки от умеренных до высоких с противоположным знаком. Собственные векторы полос 2 и 4 в PC4 равны -0,415 и 0,610 соответственно. Оксиды железа показаны в виде черных пикселей на рисунке 80a.

Минералы, содержащие Al (OH) (каолинит, иллит, мусковит и алунит), обладают очень высоким поглощением в полосе 6. Кроме того, минералы, содержащие Fe, Mg (OH), такие как хлорит, эпидот, а также карбонаты, такие как кальцит и доломит, обладают специфическим поглощением в полосах 8. Учитывая величину и знак нагрузок, полученных для полос 4 и 6 в PC5, можно сделать вывод, что этот PC подходит для отображения глинистых и филлитовых изменений (рис. 80b). Также, учитывая характеристики полос 8 и 9 для PC8, можно сказать, что этот PC представляет собой пропиловое изменение (рис. 80c). Наконец, была создана цветовая комбинация RGB PC4, PC5 и PC8 (R: PC4, G: PC5, B: PC8) для лучшего отображения оксидов железа. На рисунке

80d оксиды железа, филлитовые и глинистые изменения показаны светло-красным. Эти изменения хорошо заметны вокруг целевых областей.

Минимальная доля шума (MNF) была выполнена на полосах SWIR ASTER. Статистические результаты этого преобразования приведены в таблице 14. Собственные значения каждого преобразованного диапазона MNF представляют объем информации, которую целевой диапазон содержит из исходного изображения. Таким образом, полосы, содержащие наибольший шум, имеют собственные значения, близкие к 1. Соответственно, полосы с низкими собственными значениями будут иметь очень ограниченную пространственную целостность, что указывает на преобладание шума в этих полосах. При увеличении основного числа MNF качество изображения снижается.

Полосы 4-6 не подходят для выполнения цветовых комбинаций RGB из-за их собственных значений, близких к 1. Следовательно, только полосы MNF с процентом собственных значений больше 1, такие как полосы 1-3, рассматривались для получения цветовой комбинации RGB. На рисунке 81 показана цветовая комбинация RGB полос MNF 1-3 для исследуемой области.

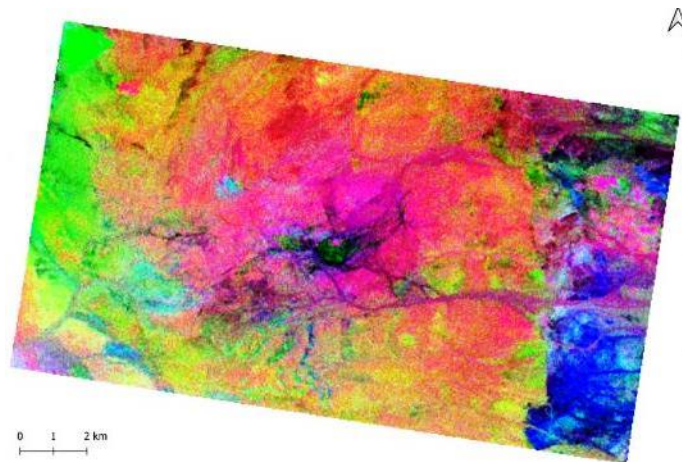


Рис. 81. Цветовое сочетание каналов MNF 1–3 для области исследования (пороги: >0,43, 0,41, 0,37 для полосы 1–3 соответственно).

Согласно этому изображению, области, подвергшиеся гидротермальным изменениям, имеют желтовато-коричневый цвет, и большинство литологических границ обычно видны, что хорошо согласуется с геологической картой района. В центральной части изображения также есть многообещающая область.

Интеграция геологических и измененных слоев.

Используя нечеткую модель АНР, все уровни изменений, полученные в результате FCC, BR, PCA и MNF, были интегрированы. Чтобы повысить точность интеграции информационных слоев, был также добавлен геологический слой, содержащий интрузивные массивы. Затем каждый из критериев был взвешен экспертами. Матрица взвешивания критериев "два на два" представлена в таблице 14.

Табл. 14. Матрица взвешивания критериев «два на два».

	Geology	PCA	MNF	BR	FCC
Geology	1	5	3	3	2
PCA	0.2	1	3	2	2
MNF	0.33	0.33	1	4	2
BR	0.33	0.5	0.25	1	1
FCC	0.5	0.5	0.5	1	1

Окончательный ранг важности каждого слоя, а также процент их влияния в комбинации представлены в таблице 15.

Табл. 15. Процент и важность информационных слоев.

	Priority	Rank
Geology	43.40%	1
PCA	20.90%	2
MNF	16.60%	3
FCC	10.60%	4
BR	8.60%	5

Для сравнения бинарных и предпочтительных критериев, которыми являются: 1-Геология 2-PCA 3-MNF 4-FCC 5-BR, на основе мнения экспертов, а также обработки данных, было проведено сравнение.

Основываясь на доступных информационных слоях, литология р-на была признана основным фактором в создании и контроле гидротермальных изменений в регионе. Поэтому при бинарном сравнении этот фактор предпочтительнее всех информационных уровней и критериев. В случае методов PCA, MNF, FCC и BR, которые были использованы для выявления гидротермальных изменений в р-не путем анализа спутниковых снимков ASTER, было проведено бинарное сравнение, основанное на достоверности и точности методов. Наконец, на основе метода АНР был рассчитан окончательный ранг каждого из этих критериев.

Как видно из таблицы 15, уровнями информации в порядке важности от высокого к низкому являются геология, PCA, MNF, BR и FCC соответственно. Каждый из информационных слоев был размыт, а затем объединен методом АНР. На основе результатов взвешивания и определения степени важности каждого информационного слоя на рисунке 82 была представлена объединенная карта гидротермальных изменений и геологических единиц, влияющих на медно-порфировую минерализацию. В центральной, западной, восточной и северо-восточной частях исследуемой территории были выявлены четыре зоны с высоким потенциалом.

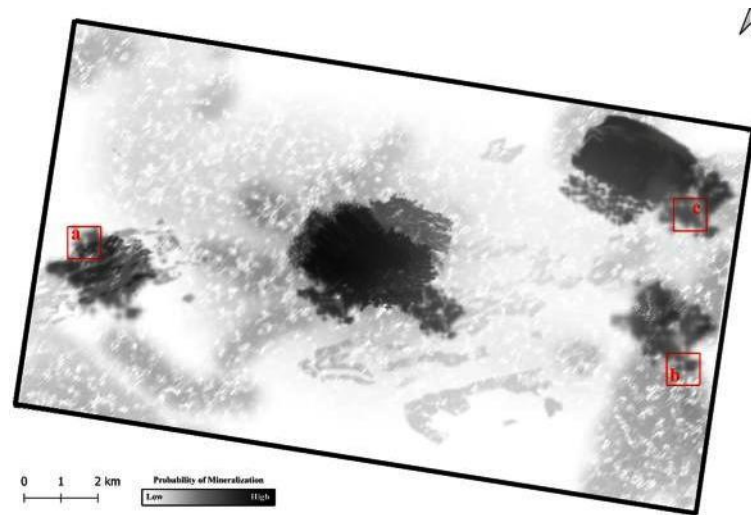


Рис. 82. Карта потенциала изучаемой территории, созданная на основе модели Fuzzy-АНР. (+80% допустимо). Вставленные красные квадраты (а, b и c) являются полевыми заверочными участками.

Полевая заверка.

На основе карты потенциала, полученной с помощью модели Fuzzy-АНР, для наземного контроля были выбраны три точки зон с высоким потенциалом. Глинистые изменения наблюдались в первой контрольной точке (фото 83а).

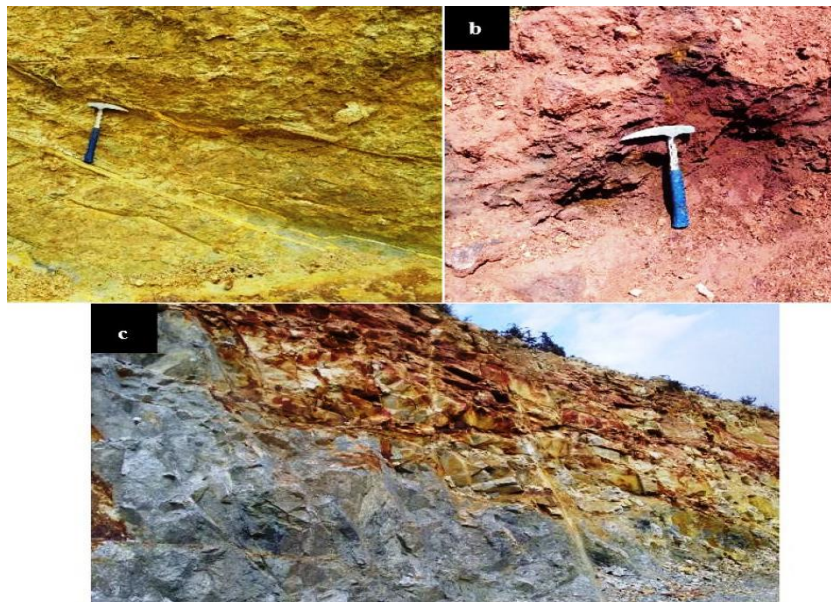


Фото 83. Полевые фотографии контрольных точек. (а) аргиллитовые изменения, (б) железокислые изменения (с) Филлическое изменение.

Изменение оксида железа наблюдалось во второй контрольной точке (фото 83b). В третьей контрольной точке наблюдалась значительная степень филлических изменений (фото 83с). Согласно минералогическим исследованиям, проведенным на образцах, взятых из целевых участков, иллит/каолинит, мусковит, гетит и эпидот/карбонат были преобладающими минералами, представляющими глинистые, филлитовые, железокислые и пропилитовые изменения соответственно, что делает вывод о достоверности результатов, полученных с помощью ДДЗ.

5.5 Данные ASTER при поисках медно-порфировых месторождений (медный пояс Керман, Иран)

Месторождения медно-порфировых руд обычно формируются на небольших глубинах земной коры (2–6 км) и связаны с обширными зональными гидротермальными изменениями, от внутренней калиевой зоны, с преобладанием биотита и калиевого полевого шпата, к филлической, аргиллитовой и пропилитовой зонам. Филлическая зона обычно содержит серицит и богатые пиритом породы, аргиллитовая зона состоит из алунитовых и каолинитовых пород, а внешняя пропилитовая зона состоит из хлорит-эпидота и кальцита. Зоны калиевых и филлических изменений тесно связаны с оруденением и, следовательно, являются объектами поисков.

Кайнозойский магматический пояс Урумие-Дохтар (UDMB) Ирана является важным металлогеническим регионом размещения порфировых месторождений Cu-Mo-Au (рис. 84). Это относительно узкая (50–80 км) линейная структура с преобладанием известково-щелочных интрузивных и экструзивных пород и сопутствующих пирокластических пород. Развитие пояса связано с последовательными этапами закрытия Тетического океана, включая субдукцию в течение мела-олигоцена и коллизию в позднем палеогене – неогене.

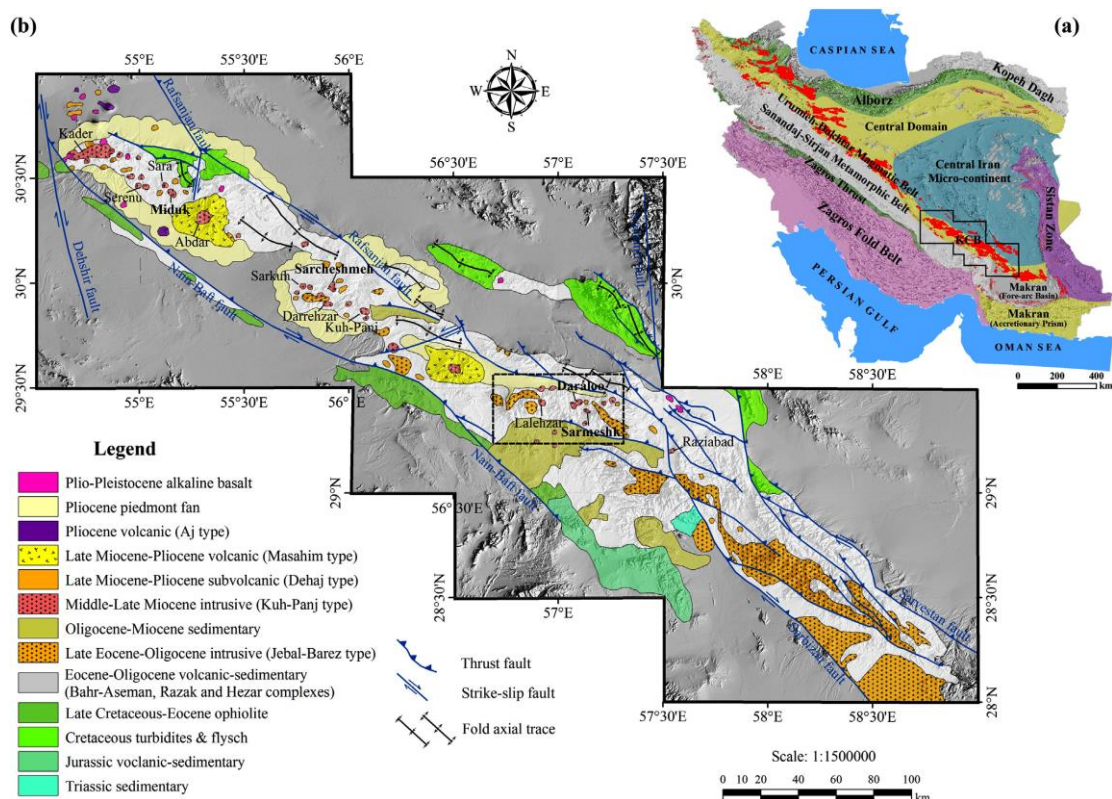


Рис. 84. (а) – структурно-геологическая схема Ирана и положение медного пояса Керман; (б) - положение рудного района Даралу- Сармешк.

В медном поясе Керман самое крупное месторождение Сарчешмех - 1200 млн т руды с содержанием 0,7% меди и 0,03% молибдена (рис. 85).

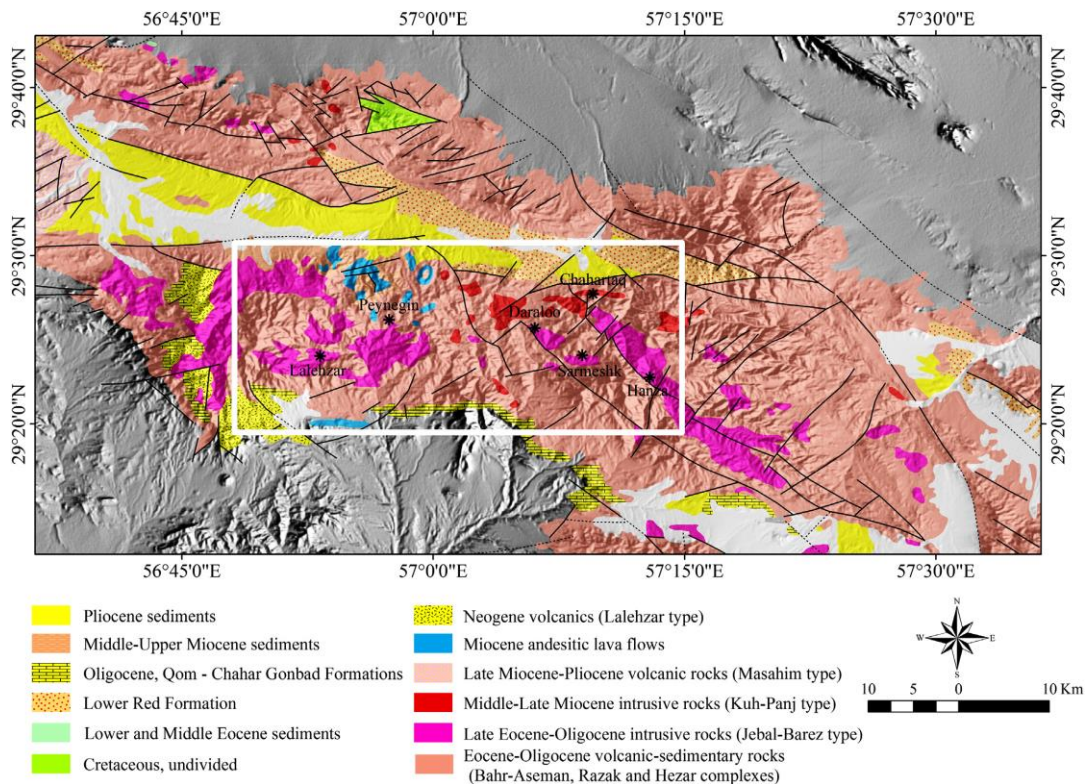


Рис. 85. Геологическая схема южной части медного пояса Керман, наложенная на карту рельефа (белый прямоугольник – рудный район Даралу-Сарמשк)

Оруденение связано с зонами калиевых, серицитовых, кремнистых, пропилитовых и местами аргиллитовых изменений и представлено кварц-сульфидными штокверками, а также вкрапленными сульфидами. Обычные гипогенные минералы - халькопирит, пирит, молибденит и борнит.

Предварительная обработка данных ASTER SWIR и VNIR включала калибровку по яркости, по отражательной способности с помощью программ Envi для уменьшения атмосферного влияния и коррекцию на основе нормирования индекса растительности для демаскирования спектральных характеристик поглощения минералов.

После процедур предварительной обработки были сформирован набор данных с девятью полосами VNIR+SWIR с пространственным разрешением 15 м, наиболее эффективных для анализа и обнаружения минералов гидротермально-метасоматических изменений пород с высокой точностью геолокации.

На основе рентгеновских дифракционных анализов был определен следующий набор минералов: 1) Для филлических изменений - мусковит, иллит и кварц в качестве основных фаз, и каолинит, альбит, хлорит, гетит и ярозит в качестве второстепенных; 2) Для аргиллитовых изменений - кварц и альбит вместе с небольшими количествами мусковита, иллита, монтмориллонита и гетита; 3) В зонах пропилитовых изменений - хлорит, эпидот, клиноцоизит и кварц как основные фазы, в меньшей степени - кальцит и мусковит; 4) Для натриево-кальциевых изменений - актинолит, тремолит, кварц и альбит при

незначительном эпидоте; 5) Для калиевых изменений - биотит и ортоклаз, связанные с кварцем; и 6) для кремниевых изменения, основные фазы - кварц, мусковит и иллит. Аналоговые спектральные характеристики минералов были взяты из Спектральной библиотеке АСТЕР (USGS). Часть этих характеристик показана на рис. 86.

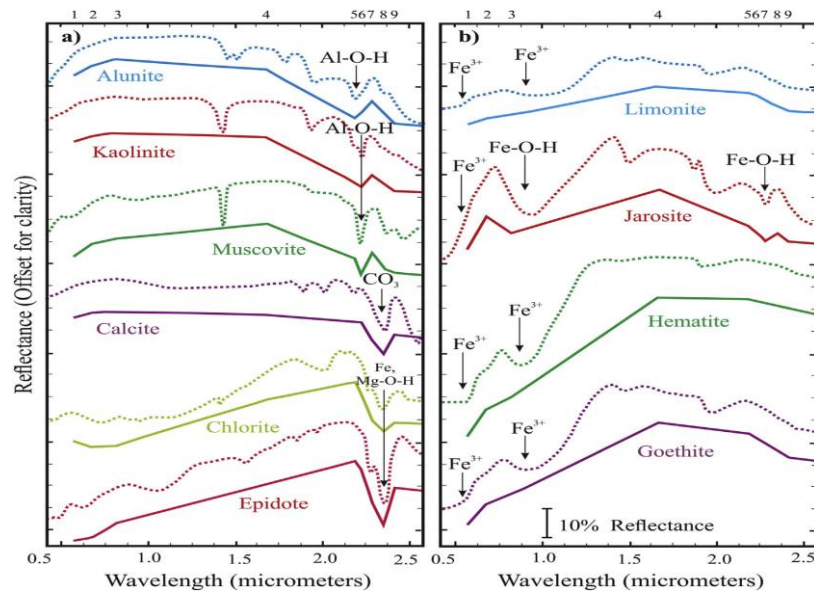


Рис. 86 Лабораторные спектры и спектры ASTER VNIR + SWIR (сплошные линии) минералов гидротермальных изменений

Медные месторождения района Даралу-Сармешк расположены в зоне разломов северо-западного простирания протяженностью 10 км и шириной 0,5–1 км. Площадь района характеризуется наличием тоналит-гранодиоритовых порфировых плутонов миоценового возраста. Эти интрузии прорывают андезитовые вулканические и пирокластические породы эоцена. Все эти толщи прорваны постмиоценовыми диабазовыми, андезитовыми и риодацитовыми дайками (рис. 87b,c).

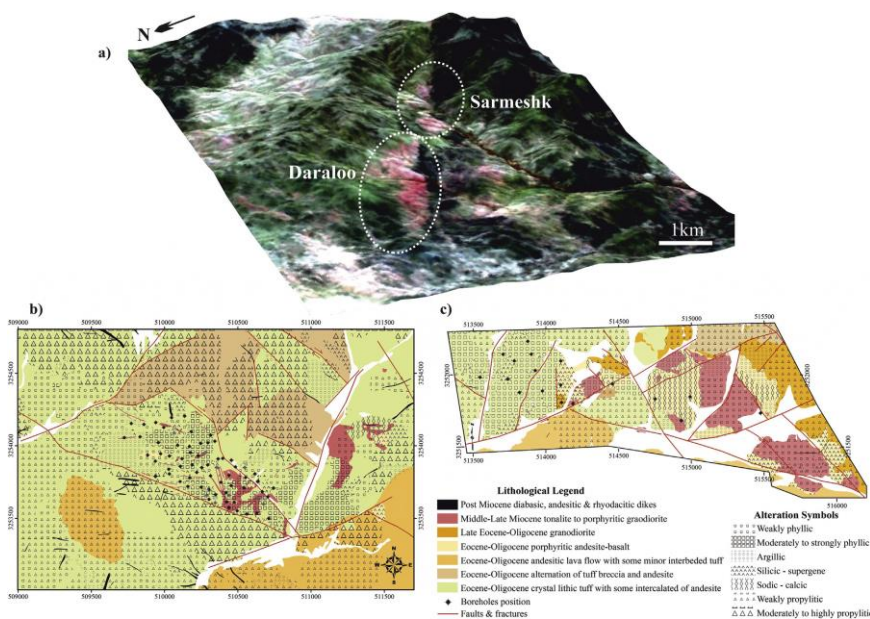


Рис. 87.(a) - ложноцветное 3Д изображение ASTER района Даралу-Сармешк (участки красноватого цвета - филлические изменения пород, зеленоватые - пропилитовые; (b и c) - геологические карты в Даралу и Сармешк соответственно.

Рудное месторождение Даралу представляет собой удлиненное тело площадью примерно $0,7 \text{ км}^2$. Развиты как серицитовые, так и кремнистые изменения. Кварц-сульфидные штокверки и вкрапленная минерализация представлены пиритом, магнетитом и халькопиритом со следами борнита и молибденита. Минерализация месторождения Сармешк делится на два типа в зависимости от характера связанных изменений. На западе месторождения развиты серицитовые и кремнистые изменения. Площадь рудной зоны со средним содержанием меди $0,3\%$ составляет около $0,3 \text{ км}^2$. В восточной части месторождения минерализация, со средним содержанием $0,2\%$ Cu, сопровождается натриево-кальциевыми изменениями. Выделяются также пропилитовые изменения с хлоритом, эпидотом и карбонатами. Гипергенные изменения представлены аргиллитами.

Для выявления пространственной связи различных типов гидротермально-метасоматических изменений пород, сопровождающих медно-порфировое оруденение района Даралу-Сармешк и съемок АСТЕР были использованы ложноцветные композиции различных спектральных зон. Всего - 468 композиций. Наиболее эффективные варианты показаны на рис. 88 – 91.

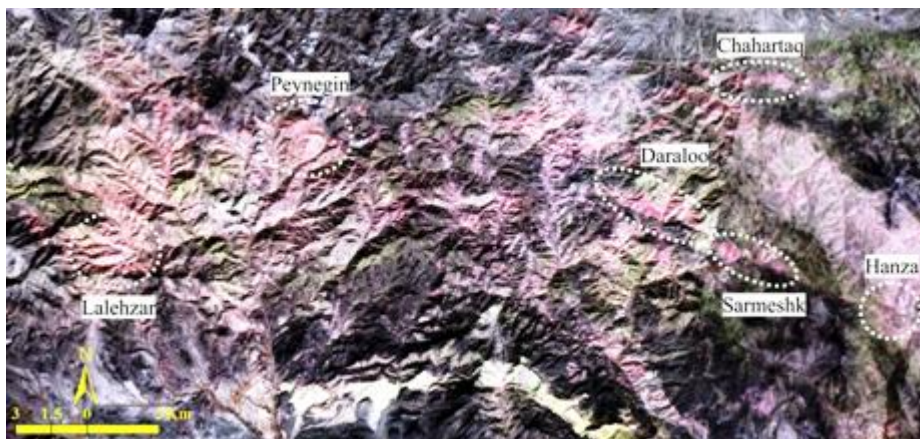


Рис.88. Филлические (серицитовые) и аргиллитовые изменения - красноватый цвет.

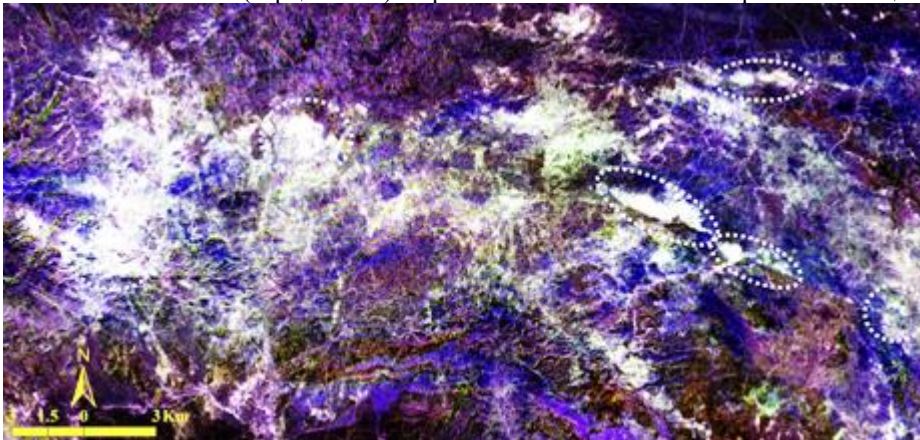


Рис. 89. Ярзитовые филлитовые и аргиллитовые изменения – белый цвет.

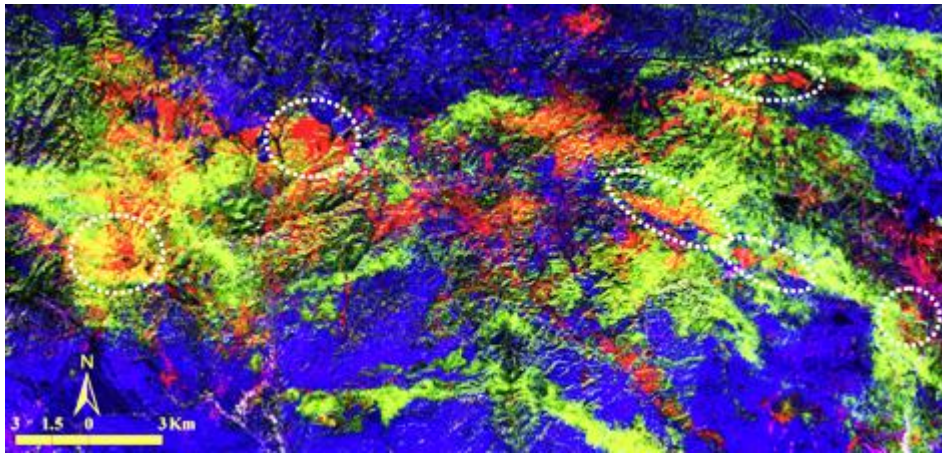


Рис. 90. Присутствие мусковита и глинистых минералов – красный цвет; зеленый цвет - присутствие хлорита-эпидота и кальцита; синий цвет - неизменные породы.

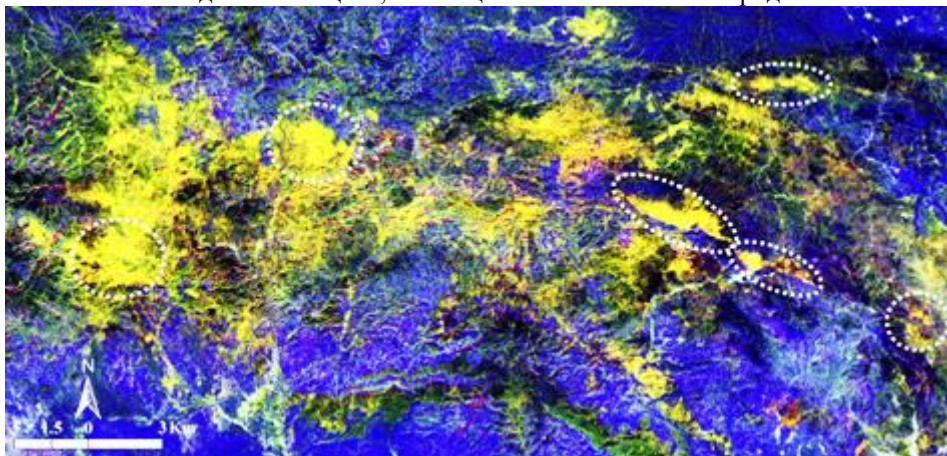


Рис. 91. Желтый цвет - присутствие мусковита и глинистых минералов; синий цвет - неизменные вулканогенно-осадочные породы; (3) темно-синий цвет - присутствие в основном хлорита-эпидота; темно-зеленый цвет - присутствие карбонатов в пропилитовых изменениях осадочных пород.

Данные VNIR+SWIR были проанализированы с использованием различных методик фильтрации, сравнивающих пиксели с эталонными спектрами (рис. 92) для идентификации филлических, аргиллитовых, пропилитовых изменений и оксидов/гидроксидов железа.

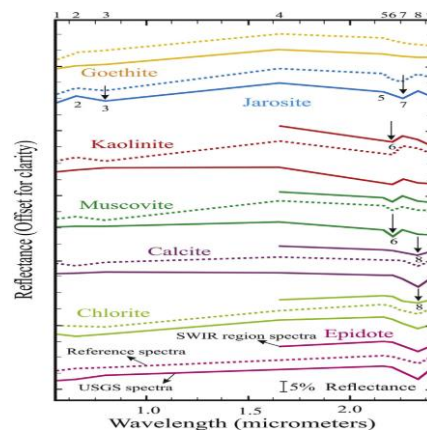


Рис. 92. Эталонные спектры (пунктирные линии) ASTER и спектры из спектральной библиотеки USGS (сплошные линии).

Гидротермальные изменения пород района Даралу-Сармешк, составленные на основе согласованной фильтрации (рис. 93) показывают, что аргиллитовые (каолинит) и филлические (мусковит/иллит) изменения приурочены к интрузивным, вулканическим и

пирокластическим породам. Хлорит-эпидот и в меньшей степени кальцит связаны с пропилитовыми изменениями вулканического происхождения. Цифры на рис. 93 обозначают расположение полевых участков, на которых проводился отбор проб с целью проверки типов изменений горных пород, выделенных на изображениях ASTER. На фото 94 различные типы изменений.

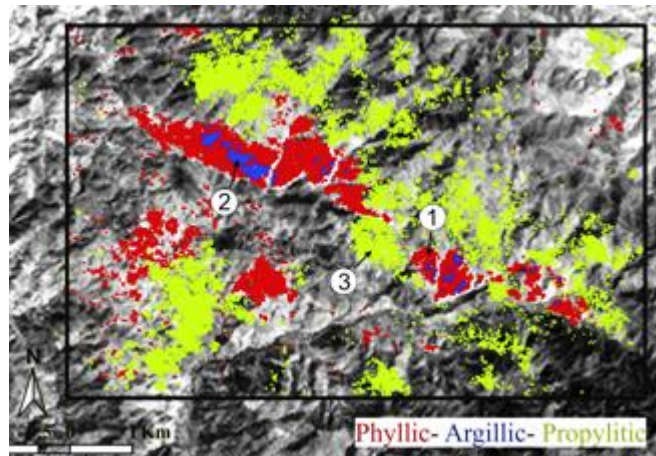


Рис. 93. Результаты метода согласованной фильтрации данных ASTERS WIR; филлические изменения (красный цвет), аргиллитовые - (синий) и пропилитовый - (зеленый); 1–3 расположение полевых участков.

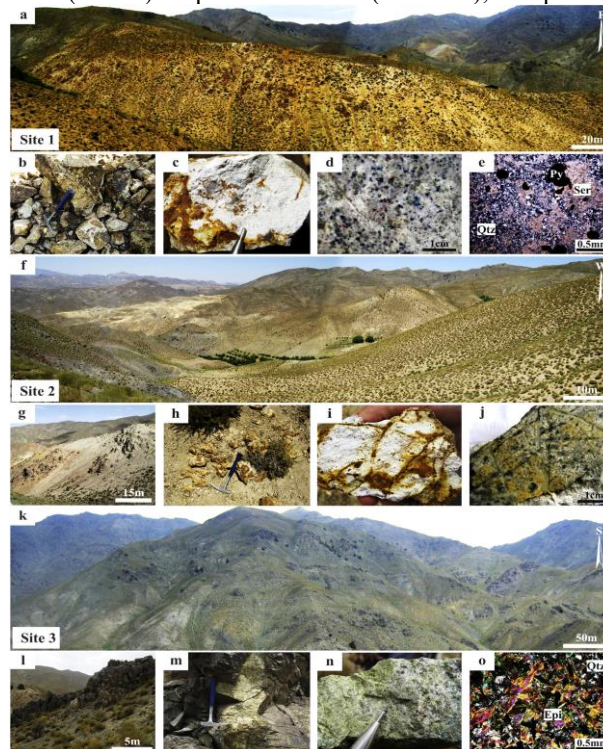


Фото 94. (а) общий план филлических изменений (участок 1); (b – e) фото руд с филлическими изменениями; (f) общий план аргиллитовых изменений (участок 2); (от g - j) фото руд с аргиллитовыми изменениями; (k) общий план пропилитовых изменений (участок 3); (i - o) фото руд с пропилитовыми изменениями.

На рисунке 95 показано развитие оксидов/гидроксидов железа, которые включают ярозит, гетит и в меньшей степени гематит и лимонит. На фото 96 различные типы изменений.

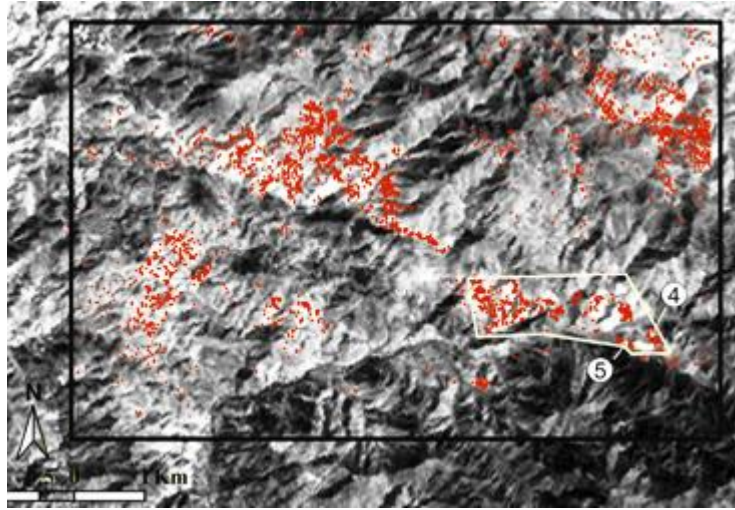


Рис. 95. Результаты метода согласованной фильтрации данных ASTERS WIR; оксиды/гидроксиды Fe (красный цвет), зона Сарמשк - белый прямоугольник, числа 4–5 – заверочные полевые участки.

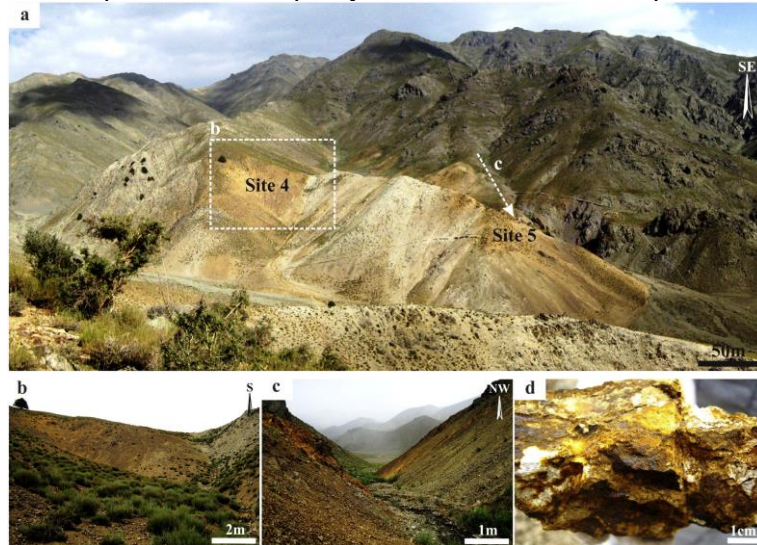


Фото 96. (а) общий план распределения оксидов/гидроксидов Fe в вулканических породах на контакте с порфировым штоком (в центре); (b – d) фото руд (участки 4, 5), содержащие оксиды/гидроксиды железа.

Данные, полученные с помощью снимков АСТЕР WIR, и выводы относительно типов и распространения изменений согласуются с полевыми наблюдениями, петрографическими исследованиями и рентгеноструктурными анализами.

Анализ данных АСТЕР TIR был использован для выявления спектральных характеристик полевого шпата и кварца при картировании кремнистых изменений. Лабораторные характеристики спектральной излучательной способности кремнезема показаны на рисунке 97а. Образцы были измерены с помощью спектрометра Micro-FTIR с использованием золотой пластины, а затем повторная выборка для разрешения диапазона МДП АСТЕР (рис. 97б).

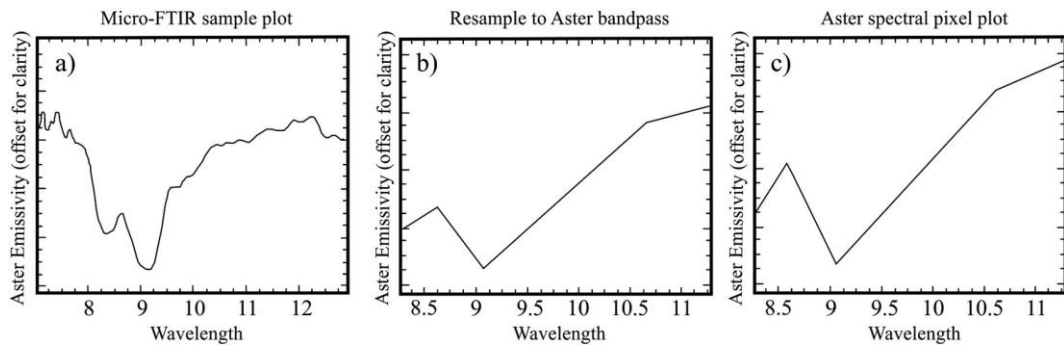


Рис. 97. (а) Спектры излучательной способности; (б) повторно дискретизированный спектр для ASTER TIR; (с) Пиксельный спектр график кварца.

Кремнистые изменения пород района по данным АСТЕР TIR показаны на рис 98.

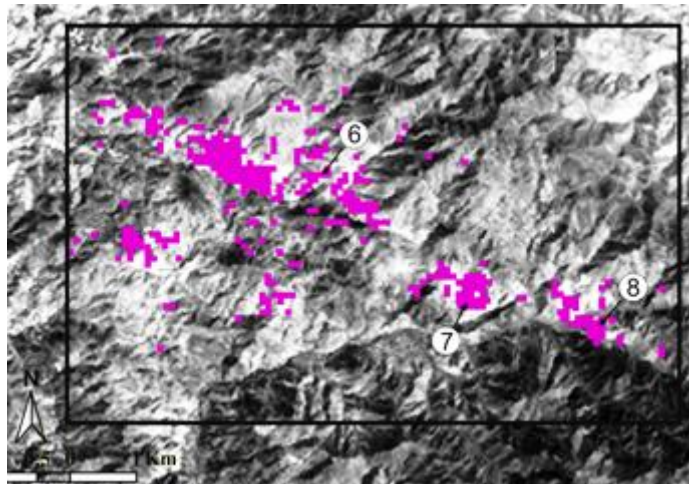


Рис. 98. Результаты картирования кремнистых изменений методом согласованной фильтрации данных ASTER TIR. 6–8 - участки отобра проб.

Гидротермально измененные породы, богатые кремнеземом, состоят в основном из кварцевых прожилков и кремнистых «шляп». Участки обогащения кремнеземом по данным ASTER TIR в целом совпадают с пространственным размещением других изменений пород по данным АСТЕР WIR и определяют общую северо-западную ориентировку основных рудовмещающих структур. Примеры горных пород и шлифов, отобранных на заверочных участках, показаны на фото 99.

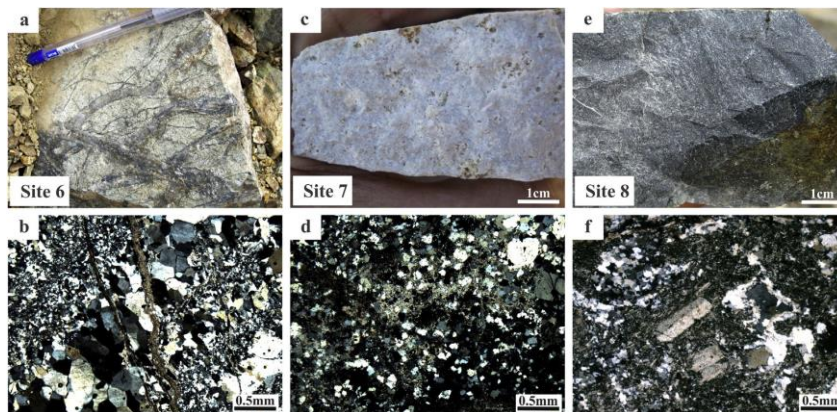


Фото. 99. Образцы и микрофотографии шлифов окремненных пород.

Таким образом, использование данных ASTER VNIR+SWIR позволило провести картирование зон гидротермальных изменений в южной части медного пояса Керман, включая: зоны филлических, аргиллитовых, пропилитовых изменений, а также зон развития оксидов/гидроксидов Fe. Все типы изменений были подтверждены последующей полевой заверкой. Выявленные гидротермально-метасоматические изменения соответствуют классическим моделям зонального распределения гидротермальных изменений, связанных с медно-порфировым типом месторождений. Кроме того, анализ данных ASTER TIR показывает, что кремнистые изменения, которые обычно не рассматриваются в порфировых системах, также связаны с минерализация данного типа в Даралу-Сармешкском районе медного пояса Керман.

Результаты исследований подтверждают, что изображения ASTER, особенно на территориях развития эрозионно-денудационных ландшафтов, лишенных мощной растительности, могут быть эффективным инструментом на начальных этапах поисков тех типов месторождений, где обширные зоны изменений являются неотъемлемой частью их геолого-генетической модели.

5.6 Картирование медьсодержащих жил на основе ДДЗ с БПЛА (р-н Шахзаде-Аббас, Иран)

Беспилотная фотограмметрия открыла новые перспективы в аэрофотосъемке для целей геологии и поисков полезных ископаемых. Сегодня беспилотная маловысотная фотограмметрия помогает в специализированном картировании, дополняя традиционное особенно в труднодоступных районах.

Так для картирования разломов был использован октокоптер в Пикканни-Пойнт на восточном побережье Тасмании, Австралия. Фотограмметрия с помощью дронов использовалась для документирования обнажений горных пород в карьере Лехотка-под-Бреми, Словакия; картографирование карьера и создание 3D-геологических моделей было проведено с помощью квадрокоптера на шахте Пенджамон, Малайзия; комбинация наземной и беспилотной фотограмметрии и гиперспектральных изображений VNIR, SWIR и LWIR была использована для получения наземных съемок в карьере Наундорф в горнодобывающем районе Фрейберг, Саксония (Германия); магнитометрическая и гиперспектральная съемки были проведены с использованием многосенсорных дронов в двух горнодобывающих районах Центральной Финляндии и др..

Целью этого исследования является проведение крупномасштабного геологического картирования с использованием фотограмметрии с БПЛА для облегчения ГРП на месторождении Cu Шахзаде Аббас. Месторождение Шахзаде Аббас расположено в 28 км к востоку от крупного месторождения порфировой руды Сар Чешме, провинция Керман, Иран. Жильная минерализация меди связана с разломами и зонами их пересечений. Снимки с БПЛА были сделаны для проецирования геологических объектов на базовую геологическую карту. Была подготовлена серия фотограмметрических продуктов с целью определения минерализованных зон для будущих наземных ГРП.

Район Шахзаде Аббас расположен в южной части третичного магматического пояса Урумие–Дохтар, вмещающего массив меди, генетически связанные с миоценовыми порфирами. Порфиры были внедрены в эоценовые вулканогенно–осадочные комплексы. Они включают базальты, андезиты, трахиандезиты, трахибазальты, риолиты, агломераты, туфы и осадочные породы. Интрузивные породы представлены гранитами, гранодиоритами, диоритами и монцонитами (рис. 100). Зоны разломов и их сочетания создавали благоприятную среду для циркуляции гидротермальных флюидов и способствовали формированию медного оруденения.

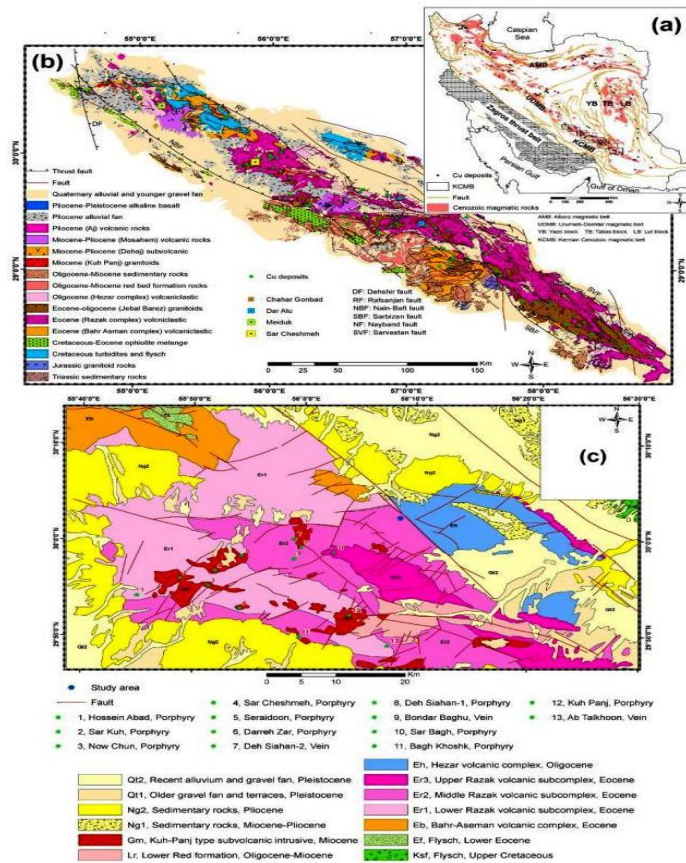


Рис. 100. (а) карта рельефа кайнозойских вулканических поясов, (б) упрощенная геологическая карта ККМП, (в) геологическая карта района исследований.

Для достижения цели исследования были проведены по следующим направлениям: (1) настройки параметров полета и управления дроном, (2) получение и обработка изображений, (3) создание проекта геологической карты, (4) полевая заверка полученных результатов.

Коммерческие многороторные платформы успешно используются для геологических целей. В этом исследовании использовался DJI Phantom 4 Pro версии 2.0 с его оригинальными датчиками (фото 101).

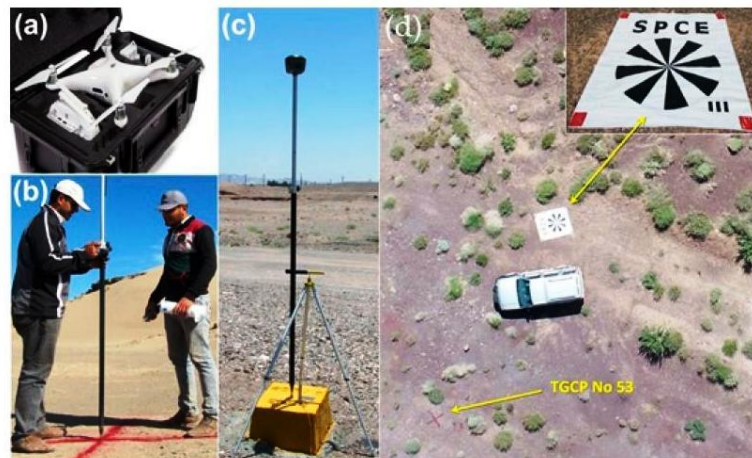


Фото 101. (а) DJI Phantom 4 Pro V2.0, (б) TGCP (маркер), (в) приемник SOUTH Galaxy G1+ на контрольный показатель и (д) звездообразная цель Сименса.

Этот легкий квадрокоптер позволяет получать снимки с высоким разрешением и приемлемым временем полета, покрывая большую площадь по сравнению с обычными более тяжелыми платформами hexacopter и octocopter. Он оснащен встроенной 1-дюймовой 20-мегапиксельной CMOS-камерой (Da-Jiang Innovations Science & Technology Co., Ltd., Шэньчжэнь, Китай) на карданном подвесе. Объектив камеры обеспечивает поле зрения (FOV) 84° с диапазоном фокусных расстояний 8,8 мм / 24 мм (эквивалент формата 35 мм) и диафрагмой $f/2,8$ – $f/11$ с автофокусом. CMOS-камера DJI Phantom 4 Pro V2.0 представляет собой RGB-сенсор. Камера получает изображения RGB, которые сопоставимы с композитными изображениями True color (TCCS) Landsat ETM+/OLI или Sentinel.

Траектория полета была разработана в программном обеспечении DJI Go (v4.0, Da-Jiang Innovations Science & Technology Co., Ltd., Шэньчжэнь, Китай). Для получения точности менее 5 см было применено минимум 70% перекрытий боковых и 80% лицевых изображений. Полет выполнялся на высоте 70 м (скорость полета 72 км/ч), чтобы обеспечить пространственное разрешение менее 10 см. Другие настройки полета выполнялись с помощью приложения DroneDeploy (версия v2.66, Infatics Inc., Санта-Клара, Калифорния, США).

Пространственное разрешение в 3,26 см было рассчитано с использованием мишени Siemens star target. Это пространственное разрешение удовлетворяло требуемой точности для определения геологических элементов (рис. 102).

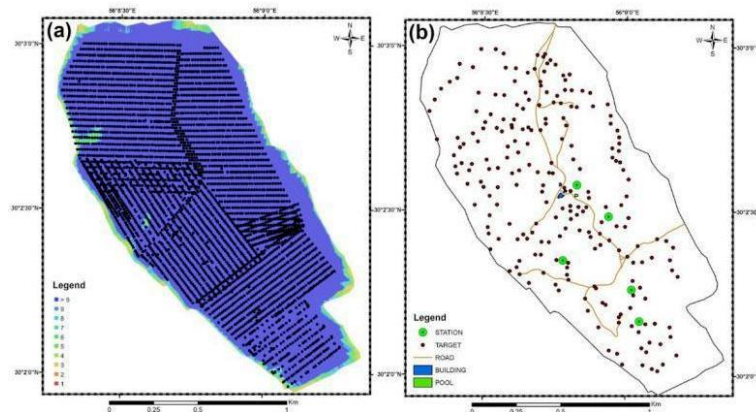


Рис. 102. (а) Расположение камер и перекрытие изображений, и (б) распределение ТГСП в районе исследования.

Было достигнуто идеальное перекрытие изображений без зазоров на площади 2,02 км². Для результирующего построения было получено ~ 4018 изображений. Географическая привязка была выполнена с использованием 220 ТГСП (около одного ТГСП на гектар). На рисунке 112b показано распределение ТГСП. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) 2,91 см была измерена для ТГСП. RMSE 3,96 см был получен для пяти контрольных точек, которые удовлетворяли требуемой точности менее 5 см для ортофото (ортомозаичного) изображения.

Встроенный GPS-навигатор DJI Phantom 4 Pro V2.0 помогает размещать геотеги на полученных изображениях для общего применения. Однако для повышения точности геометрических поправок необходима сетка временных наземных контрольных точек (TGCPs) или маркеров. Для геологического картирования была выбрана точность менее 5 см. Соответственно, для определения требований к точности было рассмотрено 220 ТГК. ТГК были отмечены в виде крестиков красного цвета на поверхности земли (фото 101б). Их точное позиционирование осуществлялось с помощью наземной кинематико-дифференциальной глобальной системы позиционирования в реальном времени (RTK-DGPS) от приемника SOUTH Galaxy (G1+, South group, Гуанчжоу, Китай) (фото 101с). Кроме того, были рассмотрены пять контрольных точек с известными координатами для оценки общей точности ортомозаичного изображения всей области. Для оценки пространственного разрешения БПЛА обычно выполняется несколько типов калибровочных мишеней, а именно bar target, Slanted Edge Test и Siemens star. Siemens star позволяет измерять пространственное разрешение во всех направлениях траектории полета БПЛА. Звездообразная мишень Siemens на плоской поверхности использовалась для определения пространственного разрешения камеры (фото 101d).

Для фотограмметрической обработки было применено программное обеспечение Agisoft PhotoScan (версия v1.4.4, ООО "Агисофт", Санкт-Петербург, Россия).

Минералы и горные породы обычно проявляют спектральные особенности в коротковолновой инфракрасной (SWIR) области электромагнитного спектра. Видимые полосы не могут предоставить жизненно важную информацию для различения горных пород и минералов. CMOS-камера DJI Phantom 4 Pro V2.0 обеспечивает RGB-изображения, которые не отображаются в виде отдельных синих, зеленых и красных полос. Этот недостаток делает невозможным применение методов обработки изображений, но эти изображения с высоким разрешением могут быть применены для геологического и структурного картирования.

В этом исследовании ортофотоснимок, созданный с использованием сетчатой модели, был загружен в программное обеспечение ArcGIS (версия 10.7) для создания проекта геологической карты. Первоначально геологические элементы были выявлены на основе визуальной интерпретации ортофотоснимка. В дальнейшем они были отредактированы и доработаны после проведения полевых работ. Образцы горных пород были взяты из заранее определенных мест для проверки литологии и выявления возможных минерализованных зон. Ортофотоснимок, который был получен из плотного облака точек, представлен на рисунке 102.

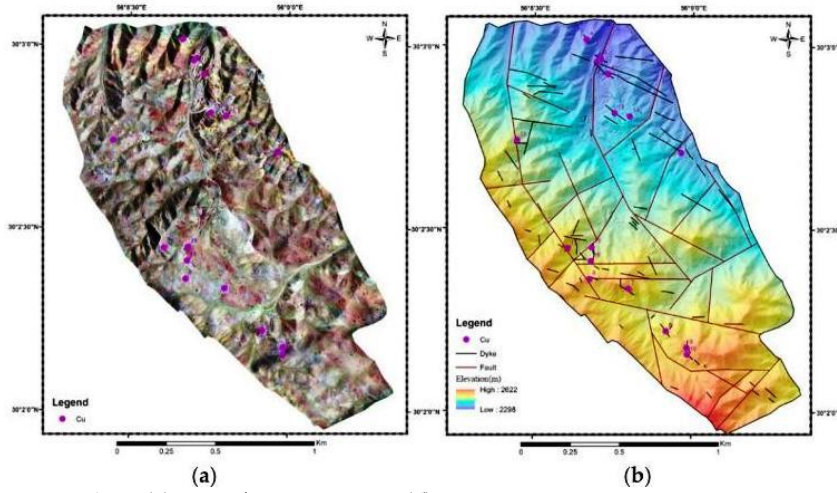


Рис. 102. (а) Ортофотоснимок и (б) модель, содержащая линейменты.

Результаты полевой заверки представлены на фотографиях 103 – 106.

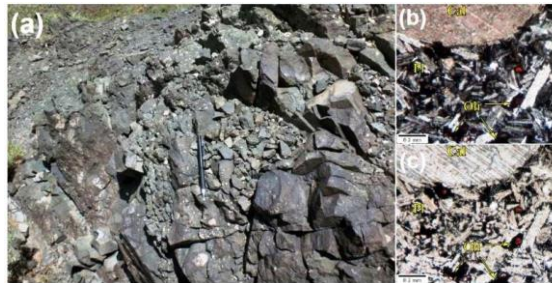


Рис. 103. (а) Обнажение базальта, (б, в) шлиф показывает минералы оливина и плагиоклаза внутри вторичный кальцит в режимах XPL и PPL соответственно. Cal: кальцит, Oli: оливин и Pl: плагиоклаз.

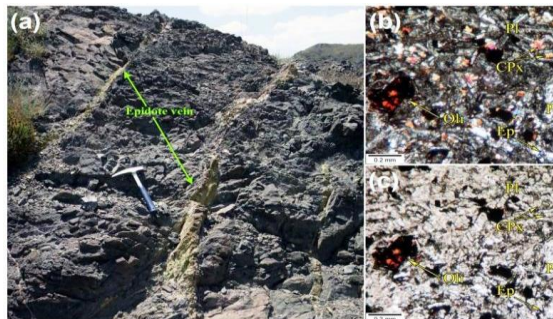


Рис. 104. (а) Обнажение андезитбазальта с прожилками эпидота, (б, в) шлиф показывает минералы оливина, плагиоклаза, клинопироксена и эпидота в режимах XPL и PPL соответственно. Cal: кальцит, CPX: клинопироксен, Ep: эпидот, Oli: оливин и Pl: плагиоклаз.



Рис. 105. (а) Андезит-порфир, (б,с) шлиф показывает минералы плагиоклаза и хлорита в XPL. и PPL соответственно, красный туф (г) и агломерат (д). Chl: хлорит и Pl: плагиоклаз.

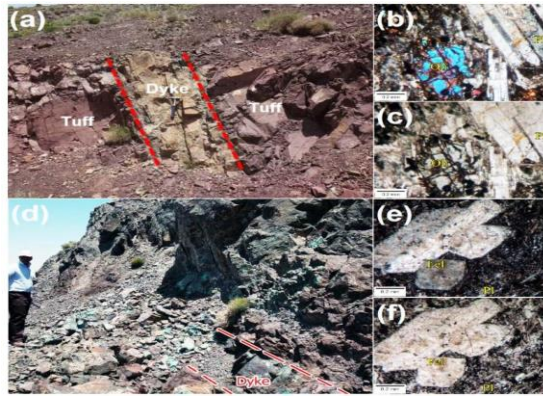


Рис. 106. (а) Выход дайки микродиоритового габбро, внедренной в толщу красных туфов, (б, в) шлиф показаны минералы плагиоклаза и оливина в режимах XPL и PPL, соответственно, (д) обнажение диабазы дайка, содержащая медную минерализацию, (е, ф) тонкий шлиф показывает минералы плагиоклаза и полевого шпата в XPL и режимы PPL. Fel: полевого шпата, Oli: оливин и Pl: плагиоклаза.

На рисунке 107 показана геологическая карта исследуемого района масштаба ~ 1:25 000, основанная на аэрофотограмметрии и полевых исследованиях.

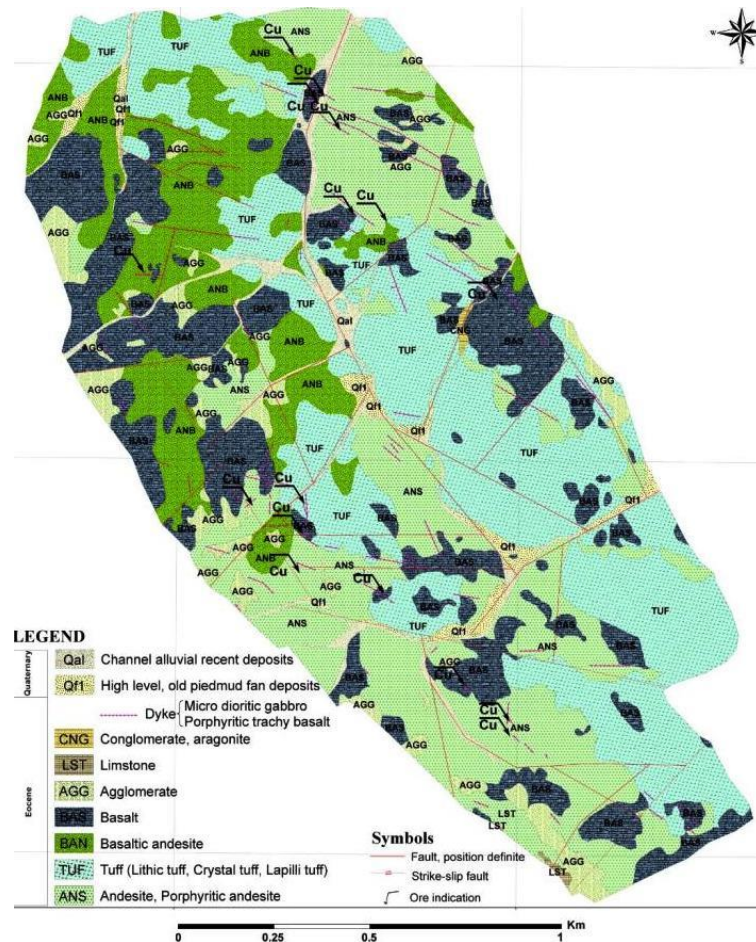


Рис. 107. Результирующая геологическая р-на Шахзаде Аббас.

Поисковый интерес для выявления медного оруденения на следующей стадии ГРП представляют показанные на карте габбро-диабазовые дайки с микро- и порфировой текстурой (рис. 107). Некоторые из них на поверхности содержат минерализацию Cu в виде малахита (фото 106d).

5.7 Использование ДДЗ при поисках ЮОС месторождений (Гренландия.)

В связи с их экономической важностью, актуальность поисков месторождений ЮОС постоянно возрастает. В тоже время создание поисковой модели - большая проблема из-за сложности и разнообразия условий их формирования.

В поисковых целях были использованы данные Copernicus Sentinel-2 Земли Инглфида, СЗ Гренландии. Интерпретация включала интеграцию данных дистанционного зондирования с аэрогеофизическими материалами. Бедные сульфидами месторождения с большими объемами оксидов железа и гидротермальными изменениями являются подходящими объектами для региональных аэромагнитных и гравиметрических исследований. В сочетании с полевыми геологическими наблюдениями гравиметрические и магнитные данные являются очень полезными, но дорогими инструментами при разведке ЮОС.

Земля Инглфилд (рис. 108), северо-запад Гренландии, в последнее время была объектом нескольких проектов с целью получения данных для разведки полезных ископаемых. Исследования проводились Геологической службой Дании и Гренландии (GEUS) (комбинированная аэромагнитная и электромагнитная съемка GEOTEM), наземные исследования (геологическое картирование, изучение минерализации и геохимическая съемка). Была составлена геологическая карта масштаба 1:500 000.



Рис. 108. Земля Инглфида на СЗ Гренландии. Геологическая карта - проект GEUS.

Для исследования были выбраны два комплекта (T19XDH и T19XEH) Sentinel-2 L1C. Они имеют 13 спектральных полос, охватывающих от видимого ближнего инфракрасного (VNIR) до коротковолнового (SWIR) (433–2190 нм) диапазона электромагнитного спектра.

Данные, использованные для интеграции с данными Sentinel-2:

- о Аэромагнитные данные
- о Электромагнитные данные во временной области (GEOTEM)
- о Геохимия русловых отложений и горных пород
- о Литология и структурно-геологические данные.

На рисунке 108 показан общий процесс обработки данных. После выполнения предварительной обработки спутниковых данных, которая включала радиометрические и др. (в основном атмосферные) поправки и повторную выборку, к данным применялись различные методы обработки выделения признаков. Аэрогеофизические данные (магнитные и электромагнитные), геохимические данные (отложения и почва) и данные полевых геологических наблюдений вносились в общую базу геоданных для интерпретации изображений.

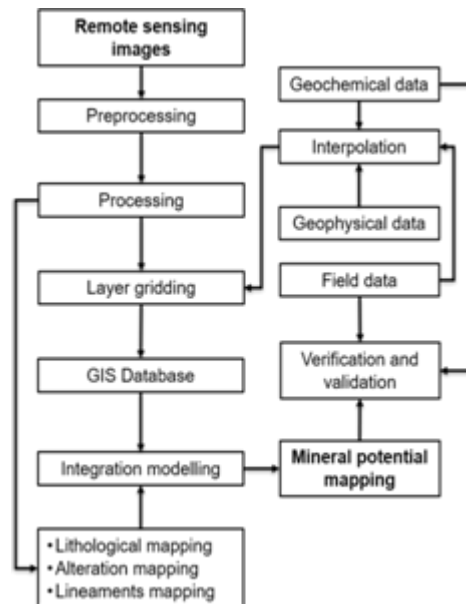


Рис. 108. Блок-схема методологии.

Sen2Cor – метод предварительной обработки данных, разработанный Telespazio VEGA Deutschland GmbH от имени ESA для корректировки Sentinel-2 Level-1C от верхней части атмосферы (TOA) до продукта с коэффициентом отражения от нижней части атмосферы (BOA). Он включает в себя классификацию сцены, атмосферную коррекцию и последующее преобразование в данные уровня 2A. Для исходных диапазонов данных использовались три различных пространственных разрешения: 60, 20 и 10 м. Данные из полос с пространственным разрешением 20 м и 60 м повторно дискретизируются до 10 м методом интерполяции ближайшего соседа.

Многие минералы, можно распознавать по положению, прочности (глубине) и форме их характеристик поглощения. Цель - уменьшить размеры пространства данных без потери информации. Эти сокращенные данные затем позволяют разделить различные спектры посредством классификации. Существует несколько методов извлечения признаков, которые оказались особенно полезными при классификации изображений дистанционного зондирования. Основное внимание уделялось соотношению полос и PCA для создания карт, основанных на характеристиках спектрального поглощения измененных минералов.

Соотношение полос - это метод, при котором цифровые числа (DN, значения яркости) одной полосы делятся на цифровые числа другой полосы. Выбор соотношений основан на пиках и впадинах кривой отражения. Обычно полоса с более высоким коэффициентом отражения делится на полосу с низким коэффициентом отражения. Соотношения полос служат в качестве индикаторов минеральных ассоциаций или отдельных минеральных групп. На рисунке 109 показана карта соотношения полос 4/2 для изменения оксида железа и 11/12 для изменения гидроксила.

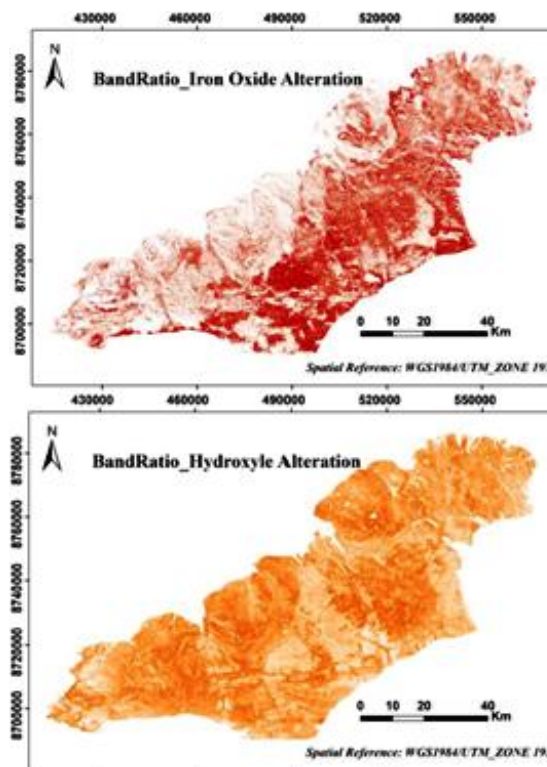


Рис. 109. Карты изменения FeO и OH, основанные на методах соотношения полос; пиксели с высокой интенсивностью цвета отмечают целевые области.

Анализ главных компонент (PCA) - это многомерный статистический метод, используемый для улучшения и отделения определенных типов спектральных сигнатур от фона. Применяя линейное преобразование, этот метод уменьшает избыточность коррелированных данных и преобразует набор коррелированных входных полос в некоррелированные главные компоненты (ПК). Величина соответствующих собственных

значений дает информацию, хотя и не полностью достоверную, о составе и распределении поверхностного материала. На рисунке 110 показан результат PCA для картирования изменений оксида железа (полосы 3, 6, 8а и 11) и гидроксильных групп (полосы 3, 8, 11 и 12).

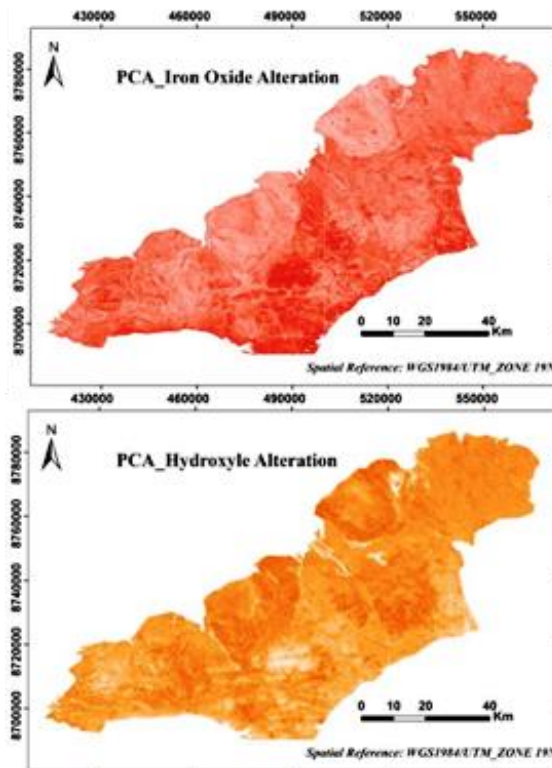


Рисунок 110. Карты изменений FeO и OH, основанные на методе PCA; пиксели с высокой интенсивностью цвета отмечают целевые области.

Линеаменты часто используются в качестве индикаторов геологических структур. По яркостному контрасту и рисунку спутникового снимка отображены линеаменты исследуемой территории. Были применены направленные фильтры к значениям PC1 PCA. Линеаменты, созданные из изображений с использованием направленных фильтров, показаны на рисунке 115.

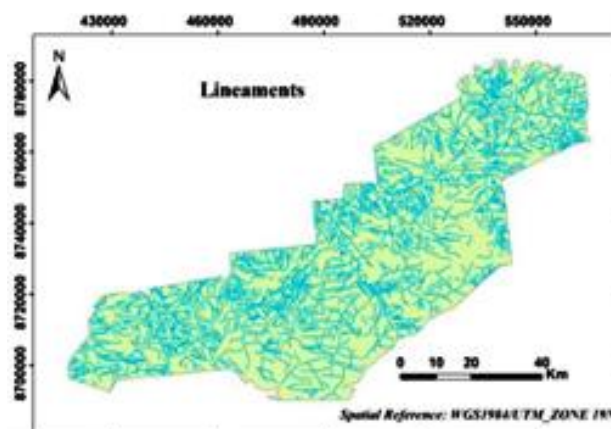


Рис. 115. Линеаменты, основанные на применении направленных фильтров.

Обработка SOM преобразует нормализованные входные данные в другой меньший набор данных. На рисунке 116 показана окончательная кластерная карта на основе алгоритма SOM.

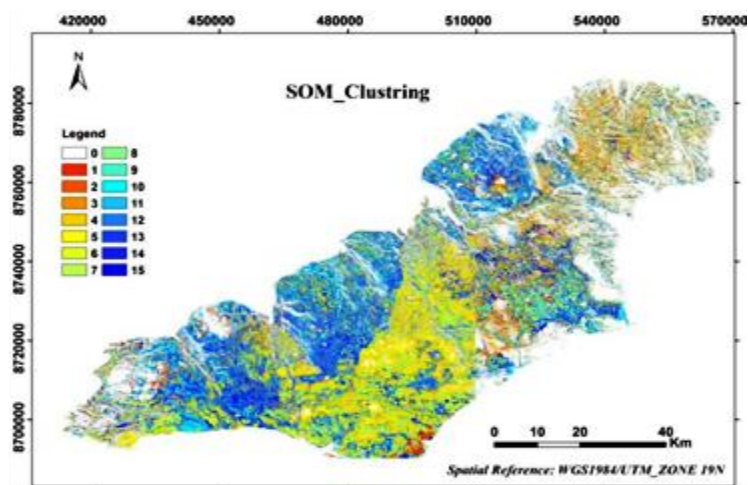


Рис. 116. Кластеризация SOM данных Inglefield Land Sentinel-2. Локации, покрытые снегом- белый цвет.

Всего на основе анализа индекса Дэвиса-Билдина было отобрано 15 к-средних кластеров. Сравнение каждого кластера с известными геологическими, литологическими данными дает ключ к классификации и прогнозу.

Машина опорных векторов SVM - один из наиболее часто используемых классификаторов для многополосных изображений. Опорные векторы (SV) используют оптимальную гиперплоскость с максимальным расстоянием между ближайшими точками. Опорные векторы лежат на границах обучающих выборок, что дает максимальный запас между двумя классами и помещает разделяющую линейную гиперплоскость между ними. Одним из преимуществ SVM является то, что он требует небольшого размера обучающей выборки по сравнению с обычными классификаторами. Обучающие образцы для классификатора SVM были отобраны на основе геологических данных. Рисунок 117 иллюстрирует литологическую классификацию на основе SVM с использованием изображений Sentinel.

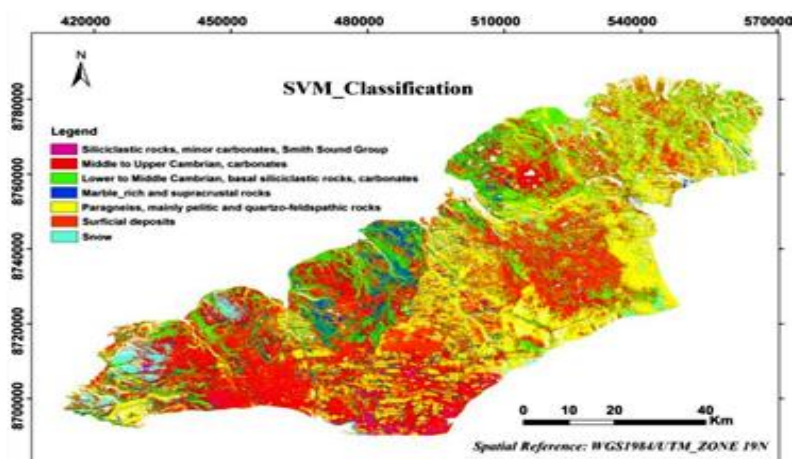


Рис. 117. SVM-классификация данных Inglefield Land Sentinel-2.

Интеграция данных является ключевым элементом проводимых исследований. Различные тематические (геологические, геофизические, геохимические) карты объединяются для создания карты перспективных участков.

Метод нечеткой аналитической иерархии *FAHP* - метод гибридной интеграции данных, основанный на нечеткой логике и весах входных слоев широко используется для принятия решений по нескольким критериям. *FAHP* основывается на трех основных принципах:

- Построение иерархии
- Выбор приоритета
- Логическая последовательность

Качество результатов *FAHP* связано с согласованностью парных сравнительных суждений. Логическую согласованность можно оценить на основе рассчитанных коэффициентов согласованности (CR). Шаги применения *FAHP* в этом проекте:

□ Девять входных уровней (рис. 118) получены из трех типов данных: дистанционного зондирования, аэромагнитных и электромагнитных.

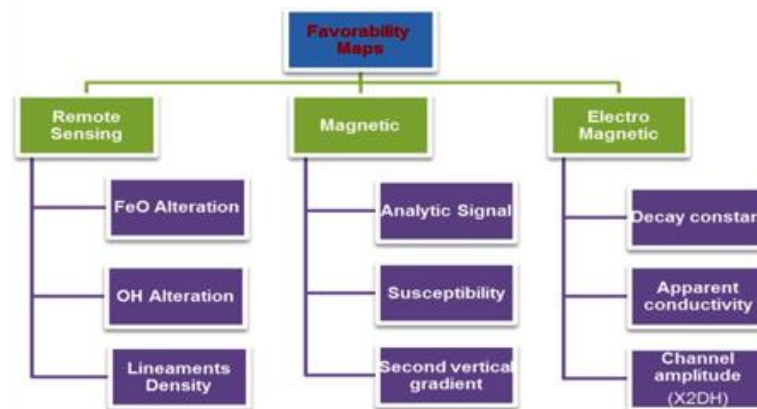


Рис. 118. Блок-схема входных слоев данных.

Карты изменений оксида и гидроксида железа и карта плотности линеаментов показаны на рисунке 119.

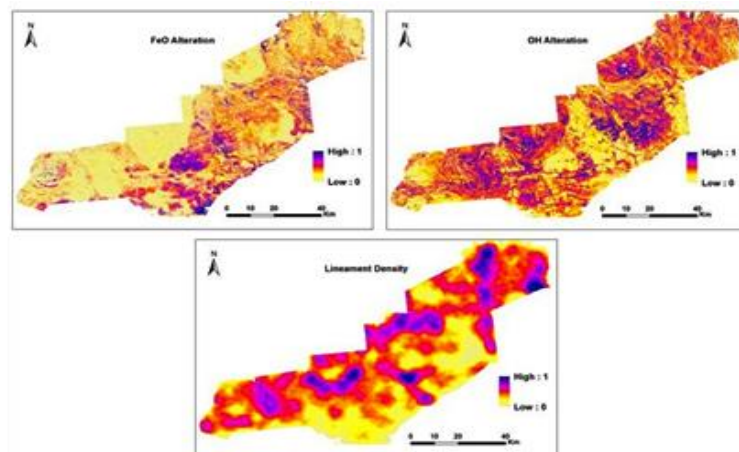


Рис. 119. Доказательные слои данных дистанционного зондирования.

В качестве входных геофизических слоев общего магнитного поля были использованы: аналитический сигнал, кажущаяся восприимчивость и вертикальная производная второго порядка (рис. 120), а также аэроэлектромагнитные данные GEOTEM: постоянная времени затухания, кажущаяся проводимость, амплитуда канала 12 (рис. 121).

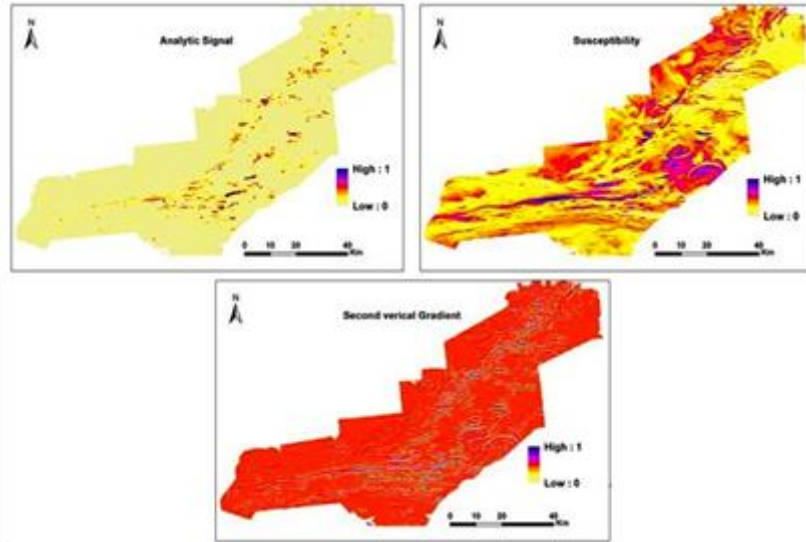


Рис. 120. Доказательные слои магнитных данных.

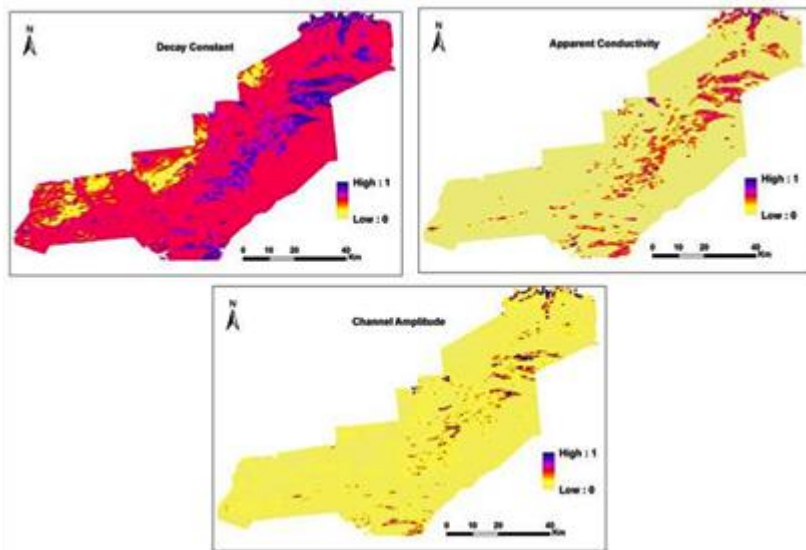


Рис. 121. Доказательные слои электромагнитных данных.

□ Матрицы парных сравнений были построены с использованием трех вариантов решений (DM) (табл. 16).

Табл. 16. Матрицы парных сравнений доказательных слоев.

DM1	FeO	OH	Lineaments
FeO	1	3	2
OH	0.33	1	0.5
Lineaments	0.5	2	1
DM2	FeO	OH	Lineaments
Feo	1	1	2
OH	1	1	2
Lineaments	0.5	0.5	1
DM3	FeO	OH	Lineaments
FeO	1	1	2
OH	1	1	1
Lineaments	0.5	1	1

□ Расчетные коэффициенты согласованности, полученные из матриц парных сравнений, были менее 0,1.

- Были составлены нечеткие оценочные матрицы по всем трем типам данных.
- Были определены веса девяти доказательных слоев.
- Доказательные слои были объединены «нечеткими суммами».
- Рассчитанные веса были умножены на соответствующие уровни доказательств.

Для интеграции карт был использован «оператор нечеткой гаммы» (гамма = 0,9) с целью построения окончательной карты перспективных участков (рис. 122).

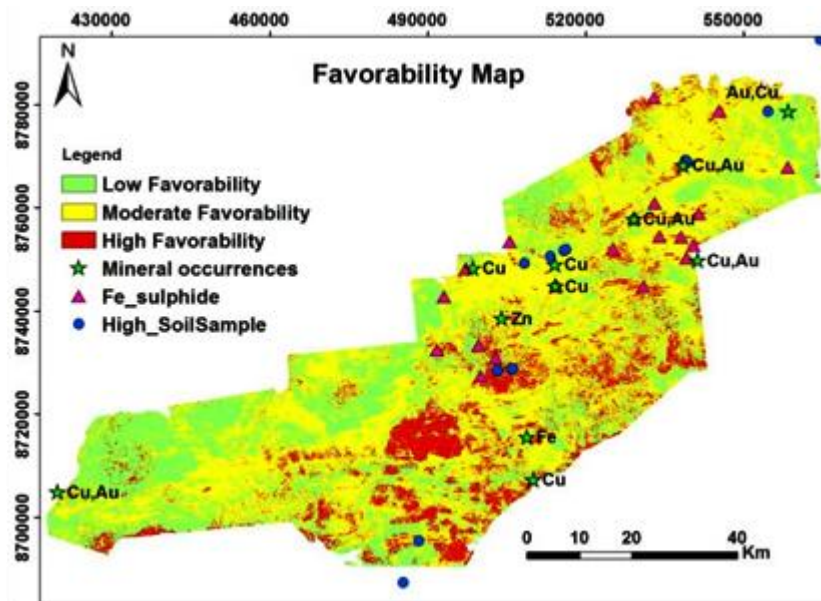


Рис. 122. Карта перспективности, основанная на применении метода ФАНР.

□ С использованием геохимической и геологической полевой информации была проведена проверка карты перспективности.

Таким образом, результаты классификаторов SOM и SVM хорошо согласуются с геологической картой территории исследования. На итоговой карте отмечается значимая корреляция между проявлениями рудной минерализации и участками с высокой перспективностью. Намеченные перспективные участки, в пределах которых не выявлены проявления рудной минерализации, с некоторой долей допущения, можно рассматривать как возможные новые поисковые площади. Интеграция дистанционного зондирования и аэрогеофизических данных с использованием различных методов корреляционного анализа дает результаты, представляющие интерес для наземных ГРП. ДДЗ Sentinel-2 предоставляют информацию, применимую для поисков ЮСГ и других типов рудных месторождений.

5.8 Картирование радиоактивной минерализованной литологии на основе ДДЗ

(р-н Нарсак, Гренландия)

Большинство высокоширотных регионов надолго покрыты снегом и льдом, что затрудняет проведение комплексных геологических полевых исследований. С помощью ДДЗ можно преодолеть некоторые проблемы. Мультиспектральные данные и алгоритмы идентификации волнового спектра позволяют прогнозировать минерализованные целевые области.

Из-за обогащения радиоактивными элементами, такими как уран и торий, генерируемый земной тепловой поток неизбежно приведет к тому, что радиоактивное тепло может быть обнаружено по поверхностным тепловым аномалиям. Информация о поверхностных тепловых аномалиях может быть получена различными способами, и технология теплового инфракрасного дистанционного зондирования является широко используемым методом. Основываясь на информации, полученной от тепловых аномалий, можно интерпретировать определенные топографические изменения (поднятия и впадины), вулканы, горячие источники, разломы и т.д. Эта технология применяется десятилетиями, и она широко используется в крупномасштабных исследованиях геотермальных ресурсов, горных исследованиях, системах раннего предупреждения о вулканах и прогнозировании землетрясений. Внедрение данных дистанционного зондирования, таких как ASTER и Landsat TIRS, эффективно увеличивает разнообразие инверсий температуры поверхности и более эффективно отслеживает радиоактивные минералы и геотермальные ресурсы, играя важную роль в ГРР.

Целью данной работы является выявление районов обогащения радиоактивными элементами и рудоносных литологий с помощью ДДЗ. Район исследования находится в регионе Нарсак на юге Гренландии (рис. 123).

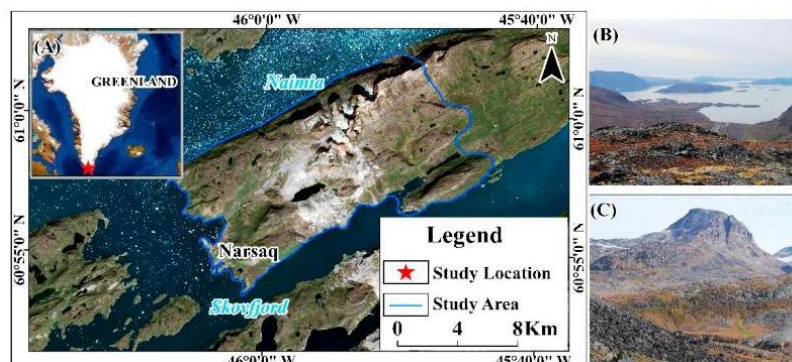


Рис. 123. (А) Карта местоположения на основе 432 комбинаций каналов истинного цвета Sentinel-20; (В,С) Реалистичный вид на окружающую среду изучаемой территории.

В геологической обстановке исследуемого района преобладают части палеократона и палеопротерозойских орогенных поясов. Он характеризуется развитием обломочных, и вулканических пород с высокой щелочной магматической активностью (рис. 124).

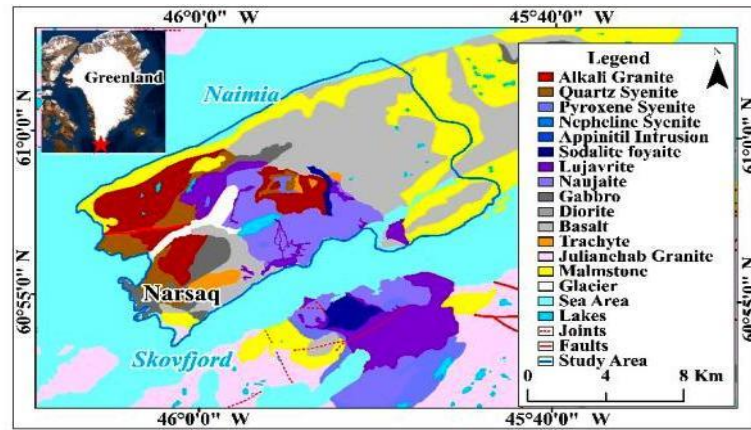


Рис. 124. Геологическая карта района исследований.

Было использовано несколько ДДЗ, в том числе: инфракрасные (NIR) данные спутника Sentinel-2AB (S2AB); тепловые инфракрасные данные спутника LANDSAT-8TIRS (LTR); инфракрасные данные спутника Worldview-2 (WV-2); модели рельефа местности с пространственным разрешением ASTER GDEM 30 м; данные спектрометра полного спектра SVC HR-1024i для наземных объектов (табл. 17).

Табл. 17. Список использованных ДДЗ.

Data Type	Maximum Spatial Resolution (m)	Acquisition Time
Worldview-2	0.5	29 August 2017
Landsat 8 TIRS	15	29 July 2018, 7 August 2018, 26 August 2019
Sentinel-2	10	10 August 2019, 6 April 2020
ASTER GDEM V3	30	August 2019
SVC HR-1024i	-	July 2019

Данные дистанционного зондирования со спутников с видимым БИК-спектром были отобраны из спутниковых данных S2AB и WV-2. Среди них основной полезной нагрузкой спутника Sentinel является мультиспектральный тепловизор (MSI), работающий в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах спектра с наземным разрешением 10 м, 20 м и 60 м соответственно. Спутник WV-2 представляет собой спутниковые данные с высоким пространственным разрешением, способные предоставлять панхроматические изображения с разрешением 0,46 м и мультиспектральные изображения с разрешением 1,8 м.

Данные LTR были выбраны в качестве источника информации о тепловом инфракрасном излучении, тепловой инфракрасный датчик которого охватывает два тепловых инфракрасных диапазона, оба из которых имеют разрешение 100 м в диапазоне длин волн 10,60–12,51 мкм.

Топографические данные были извлечены с использованием ASTER GDEM V3, цифровой модели рельефа, полученной спутником Terra, с разрешением в одну угловую

секунду (30 м), охватывающей 99% глобальной поверхности суши от 83° северной широты до 83° Южной широты.

Полевые спектры собирали с помощью спектрорадиометра полного спектра SVC HR-1024i, который имеет спектральный диапазон измерений 350-2500 нм и в общей сложности 1024 канала. Спектральное разрешение составляет 2,8 нм в диапазоне 350-1000 нм, 3,6 нм в диапазоне 1000-1900 нм и 2,5 нм в диапазоне 1900-2500 нм.

Предварительная обработка данных дистанционного зондирования проводилась с использованием программного обеспечения Envi (версия 5.6), который предоставляет ДДЗ из нескольких источников с радиометрической калибровкой, атмосферной коррекцией FLAASH, геометрической коррекцией и улучшением изображения в качестве этапов предварительной обработки изображений. Измеренная спектральная информация была получена из 50 образцов горных пород в условиях темной комнаты. Всего было собрано 128 достоверных спектров (Рис. 125).

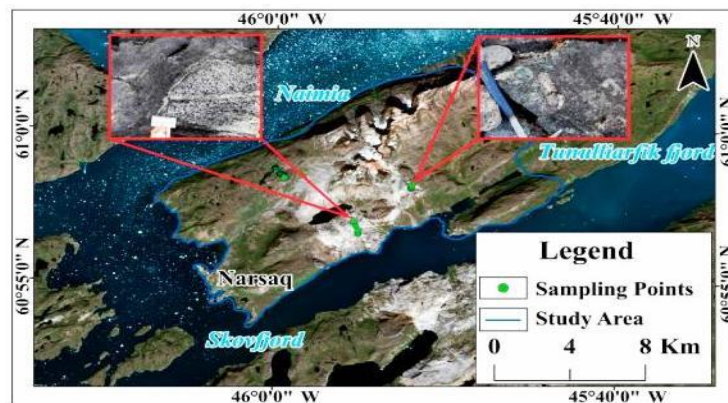


Рис. 125. Карта сбора полевых спектров (базовое изображение представляет собой комбинацию 432 полос Сентинел-2).

Была проведена визуальная интерпретация литологии в исследуемом районе. Изображения были улучшены с использованием метода направленной сверточной фильтрации 5 на 5. Для извлечения информации об изменениях горных пород использовался анализ основных компонентов (PCA), для извлечения гидроксильных и железистых изменений. В полосах 2, 4 и 11 Sentinel-2 двухвалентные и трехвалентные ионы железа имеют характерные полосы поглощения. Минералы изменений, которые содержат гидроксильные или карбонатные ионы, включающие хлорит и каолинит имеют две особенности по сравнению с другими спектрами - при длинах волн 1,0–1,4 мкм образуется медленно поднимающееся плато, в то время как спектр при 1,9–2,0 мкм образует чрезвычайно сильную поглощающую долину, что указывает на свойства поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне; следовательно, полосы 2, 8 и 12 из Sentinel-2 были выбраны для извлечения гидроксильных изменений.

Метод извлечения литологических данных с помощью опорных векторов (SVM) минимизирует априорное вмешательство и, следовательно, более объективно представляет результаты классификации (рис. 126).

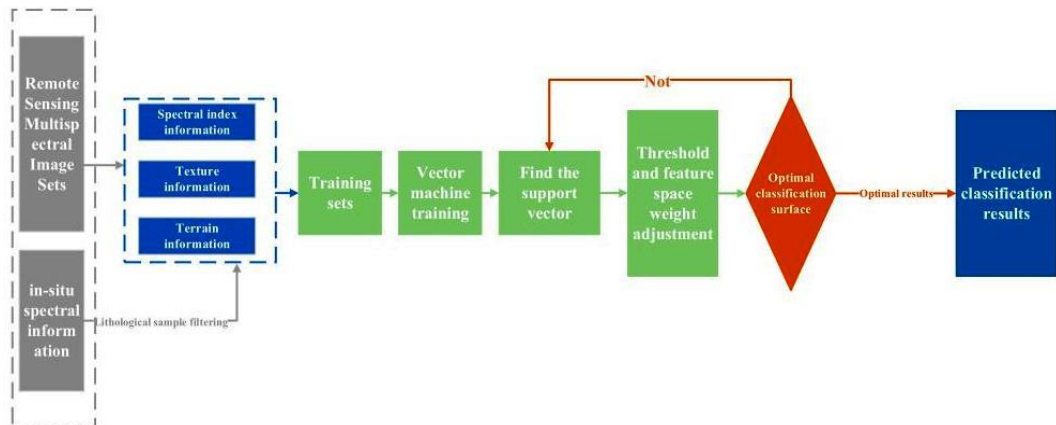


Рис. 126. Процесс распознавания классификации методом опорных векторов.

SVM-подход обладает высокой производительностью обобщения и не требует предварительных знаний, даже если размерность входного пространства высока. Извлечение алгоритма SVM основано на нахождении гиперплоскости при условии, что набор точек принадлежит любому из двух классов, так что доля точек в одном классе на одной стороне максимизируется, а также максимизируется расстояние между любым классом и гиперплоскостью (рис. 127).

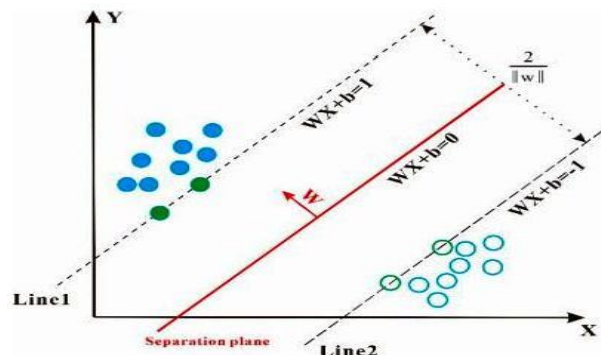


Рис. 127. Схема машины опорных векторов.

Критическим шагом в использовании нелинейных SVM является выбор функции ядра, которая выполняет специальное пространственное нелинейное преобразование, приводящее к проецированию обучающих данных в многомерное пространство признаков, которое непосредственно определяет размерность функции классификации. Классификация SVM была проведена с использованием ENVI 5.6. Благодаря узкополосному и полному спектральному охвату спектрорадиометра SVC можно эффективно охарактеризовать тонкие спектральные различия образцов горных пород, собранных в полевых условиях. Спектральная информация измеренного признака сравнивается со спектральной информацией ДДЗ для повышения точности и эффективности выбора обучающей выборки.

Собранные образцы горных пород относились к четырем типам: габбро, луаврит, базальт и науайит. Луаврит, который связан с радиоактивной урановой рудой, был проанализирован с помощью петрографической идентификационной микроскопии, и все собранные образцы содержали высокое минеральное содержание эвдиалита (рис. 128).

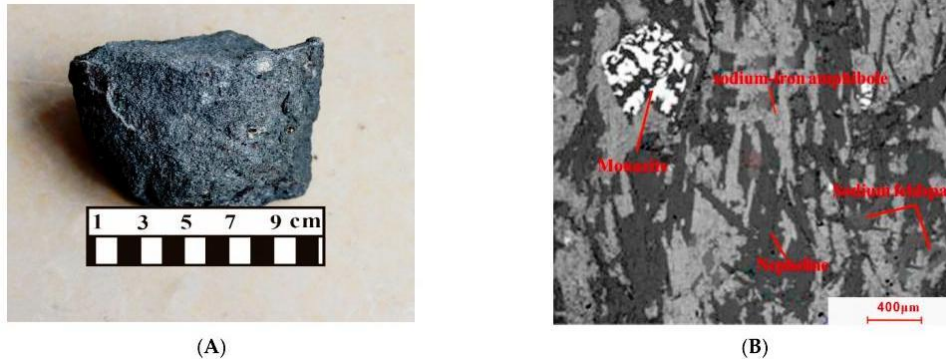


Рис. 128. (А) Образец руки луаврита; (В) микроскопическая фотография Луаврита.

Извлечение информации о тепловых аномалиях.

Инверсия температуры поверхности тесно связана с различными ресурсными и экологическими процессами на поверхности Земли. В этом исследовании метод уравнения переноса излучения (RTE) используется для инвертирования температуры поверхности. Он основан на данных профиля атмосферы в реальном времени, включая влажность, температуру и давление, и использует значения энергии излучения, полученные из отдельных тепловых инфракрасных диапазонов, наблюдаемых спутниками, при одновременном устранении эффектов, связанных с атмосферой. RTE преобразует значения теплового излучения в температуры поверхности после вычитания влияния коэффициента атмосферного поглощения в качестве фактора параметра, в результате чего значения влияния атмосферного теплового излучения могут быть получены на основе атмосферных данных (табл. 18). Расчет показан в уравнении.

$$L_{\text{sensor}} = [\epsilon B(T_s) + (1 - \epsilon)L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow} \quad (1)$$

$$B(T_s) = [L_{\text{sensor}} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \epsilon)L_{\downarrow}] / \tau \epsilon \quad (2)$$

T_s - температура поверхности в Кельвинах; излучение абсолютно черного тела обозначается буквой B ; L обозначает излучение, где стрелки, направленные вверх и вниз, представляют восходящее и нисходящее излучение атмосферы; а удельное излучение поверхности и коэффициент пропускания атмосферы в тепловом инфракрасном диапазоне обозначаются ϵ и τ , соответственно.

Табл. 18. Параметры атмосферного профиля.

Data Type	Imaging Time	Atmospheric Transmissivity τ	Atmospheric Upward Radiation L_{\uparrow} ($w/m^2/sr/\mu m$)	Atmospheric Downward Radiance L_{\downarrow} ($w/m^2/sr/\mu m$)
Landsat TIRS10	7 August 2018	0.95	0.30	0.53
	29 July 2018	0.92	0.51	0.87
	26 August 2019	0.96	0.24	0.42

Из-за непрерывного атмосферного профиля атмосферные параметры изменяются на разных высотах, что также приводит к различиям в освещенности атмосферы. Двумя

основными параметрами в алгоритме RTE являются атмосферное восходящее и нисходящее излучение и параметры пропускания атмосферы, для которых температура поверхности рассчитывается по следующей формуле:

$$T_s = K_2 / \ln(1 + K_1 / B(T_s)) \quad (3)$$

где K_2 и K_1 - константы, зависящие от выбранных метаданных спутника.

Прогнозирование оруденения на основе метода весоности доказательств (WofE), основан на геостатистическом подходе к прогнозированию минерализации, использующий байесовскую модель статистического анализа. Этот подход достигается путем разделения всех уровней доказательств на двоичные переменные - слои доказательств, содержащие только атрибуты '0' и '1', где '0' означает, что ни одной единицы доказательств в элементном слое не существует (нет руды), а '1' означает, что она существует (содержит руду). Предполагая, что количество единиц измерения в исследуемой области выражается как S , элемент события A выражается как элемент слоя (аномалия гидротермальных изменений, структура контроля минералов, литология, классифицированная SVM, радиотермическая аномалия и т.д.), а B выражается как рудоносная единица. $P(B) = \text{Площадь}(B) / \text{Площадь}(S)$ обозначает предшествующую вероятность события B , где $\text{Площадь}()$ обозначает площадь. В качестве основы для критерия в исследуемой области были введены байесовские статистические соотношения, при этом A_i^+ , A_i^- обозначали наличие и отсутствие благоприятных условий A_i соответственно, которые разделили исследуемую область на четыре объединенные части, выраженные как $B \cap A_i^+$, $B \cap A_i^-$, $B^- \cap A_i^+$, $B^- \cap A_i^-$. Апостериорная вероятность вычисляется по следующей формуле:

$$P(B | A_1 A_2 \dots A_n) = e^{\sum_{i=1}^n W_i} / (1 + e^{\sum_{i=1}^n W_i}) \quad (4)$$

Для каждого слоя доказательств необходимо ввести значение контраста C , $C = W^+ - W^-$, чтобы выразить его корреляцию с отложением или залеганием. На силу корреляции указывает значительное значение C , при этом положительное или отрицательное значение C представляет положительную или отрицательную взаимосвязь между слоем и ориентировочной минерализацией. Индекс студентизации (SI) определяется как:

$$SI = C / \sqrt{\delta^2(W^+) + \delta^2(W^-)} \quad (5)$$

Элементы доказательств в слоях были сопоставлены друг с другом в группах по два, были рассчитаны веса элементов доказательств, и слои были объединены статистически с использованием суперпозиционного анализа для получения окончательного апостериорного распределения вероятности минерализации.

Всего было проанализировано 13 литологий, включая габбро, сиенит, дитроит и люаврит. Люаврит, содержащий стеенstrupин и эвдиалит, является основным рудным минералом в исследуемой области (рисунок 129).

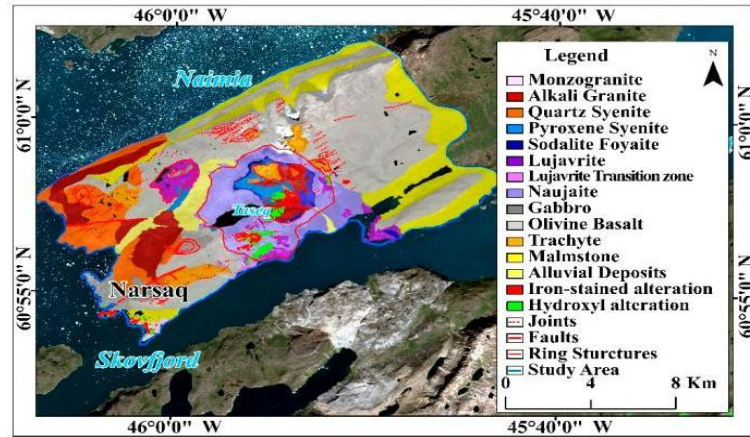


Рис. 129. Интерпретированная карта ДДЗ (базовое изображение представляет собой комбинацию 432 каналов Sentinel-2).

Тектоника в целом ориентирована на восток (рис. 130А). Диаграмма розы простираения показывает, что наибольшая частота тектоники наблюдается между ориентациями ССВ и СВВ (рис. 130Б).

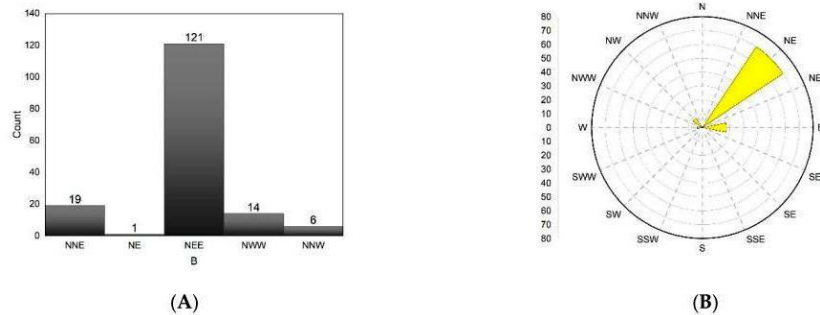


Рис. 130. (А) Статистическая гистограмма линейного тектонического простираения; (В) Диаграмма линейных тектонических простираений.

Железистые изменения в основном согласуются с расположением поверхностных обнажений науяита и лухаврита. Спектральные характеристики поглощения были рассчитаны с использованием программного обеспечения IDL DISPEC. Эти характеристики описывают форму спектра, отраженную глубиной, шириной, площадью и асимметрией (таблица 19).

Табл. 19. Спектрально-абсорбционные характеристики люаврита.

Wavelength (μ)	Depth	Wide	Area	Asymmetry
0.40	47.87	0.37	18.02	0.78
1.92	30.84	0.20	6.41	0.84
1.42	10.72	0.12	1.31	0.61
1.66	4.80	0.07	0.37	0.81
1.28	0.20	0.02	0.004	1

Люаврит, связанный с оруденением, имеет следующие характеристики (рис. 131): (1) медленно поднимающееся плато в диапазоне длин волн 1,0–1,3 мкм; (2) чрезвычайно

сильная впадина поглощения в спектре 1,9-2,0 мкм, что указывает на то, что он проявляет свойства поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне; (3) спектр поглощения после удаления сплошного слоя имеет максимальную глубину впадины поглощения 47,87 при 0,4 мкм - площадь, ограниченная огибающей и спектральной кривой, здесь самая большая, а диагностический спектр расположен на 0,4 мкм. Он также демонстрирует высокие характеристики поглощения при 1,92 мкм и 1,42 мкм, как показано в таблице 19, что доказывает, что на него влияет вибрация молекул воды и скачок гидроксильных ионов.

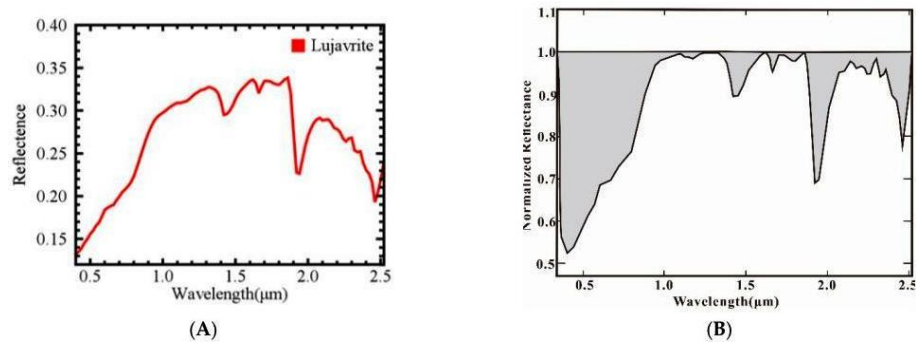


Рисунок 131. (А) Характеристики поглощения спектров удаления континуума луваврита; (В) Характеристика спектров луваврита in situ.

При определении литологии SVM использовались два основных параметра — информация о текстуре и рельефе. Информация о текстуре была рассчитана с использованием PCA и матрицы формул оттенков серого. Были использованы данные изображения WV-2, спектр которого охватывает диапазон 0,4–1,04 мкм; в этом диапазоне видно из характеристики поглощения в таблице 19 что луваврит обладает сильными поглощающими и сильными отражающими свойствами в ближнем инфракрасном диапазоне.

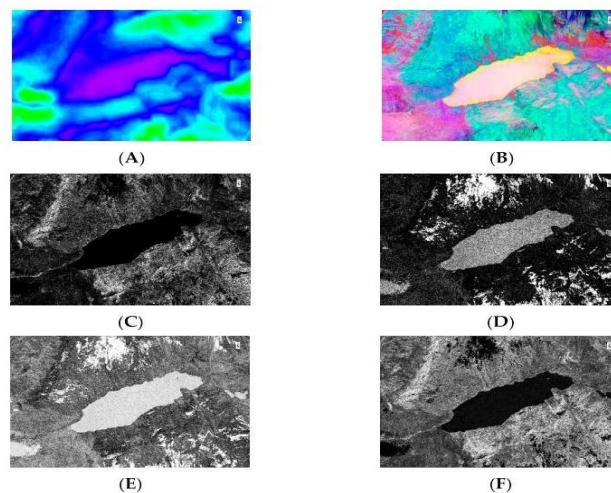


Фото 132. (А) Рельеф; (В) особенность PCA; (С) функция контраста; (D) Угловой второго порядка особенность момента; (Е) функция однородности; (F) особенность фазового несходства.

Кроме того, наиболее информативные полосы изображения сосредоточены в полосе истинного цвета; поэтому полосы 1, 2, 5 и 8 были выбраны для улучшения изображения с использованием PCA (фото 132b), это изображение использовалось при извлечении

информации о литологической текстуре РСА. Информация о текстуре WV-2 также была извлечена с использованием матрицы формул оттенков серого и контрастности (фото 132С), угловых моментов второго порядка (фото 132D), однородности (фото 132E), и несходства фаз (фото 132F). Эта информация была выбрана в качестве статистики признаков. Рельеф был рассчитан с использованием информации об уклоне, извлеченной из SVM (фото 132А). Перед классификацией растры рельефа и текстуры были пространственно пересчитаны, чтобы гарантировать, что информация имеет одинаковый размер изображения.

Результаты классификации литологии SVM показаны на рисунке 133.

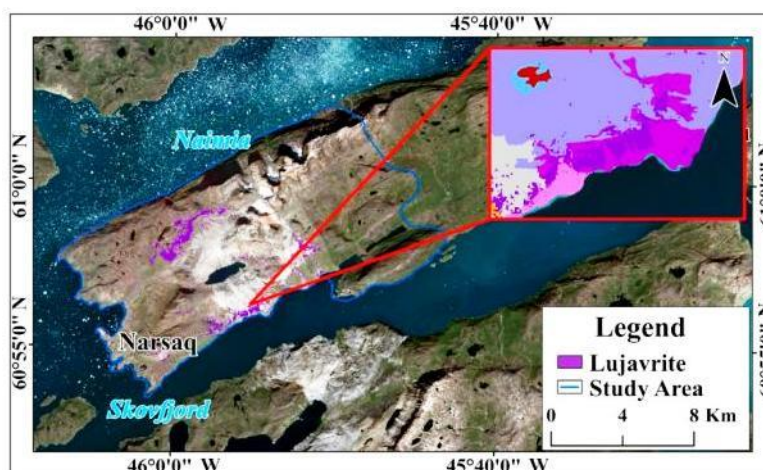


Рис. 133. Карта классификации литологии SVM (базовое изображение представляет собой комбинацию каналов Worldview-20 s 321).

Была оценена точность результатов классификации литологии SVM в таблице 20.

Таблица 20. Таблица оценки точности результатов для классификации с использованием SVM.

Lithological Category	Lithological Category (Ground Truth Data)				Total	User Accuracy
	Gabbro	Lujavrite	Basalt	Naujaite		
Gabbro	134	4	9	8	155	86.45%
Lujavrite	4	189	1	17	211	89.57%
Basalt	13	0	94	9	116	81.03%
Naujaite	4	10	1	156	171	91.23%
Total	155	203	105	190	653	
Producer accuracy	86.45%	93.10%	89.52%	82.11%		

Overall Accuracy = 87.75%; Kappa coefficient = 0.84.

Из таблицы видно, что точность классификации составляет 89,57%; общая точность классификации SVM составляет 87,75% с коэффициентом каппа 0,84. На полевом маршруте был закартирован лужаврит (рис. 132С), а породы были инъецированы натрий–железистым амфиболом с полосчатой структурой (рис. 132Б).

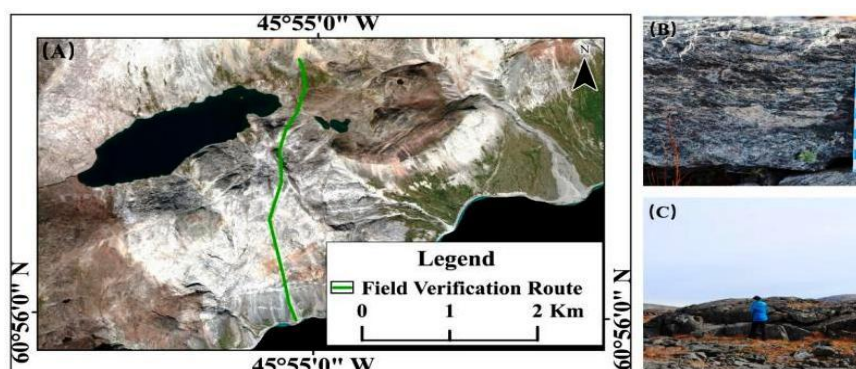


Рисунок 134. (А) Карта маршрута полевой проверки (базовое изображение представляет собой комбинацию каналов Sentinel-20 s 432); (В,С) Серовато-черный плотный люаврит.

Большинство эквивалентов урана в исследуемой области составляют более $4,3 \times 10^{-6}$, в то время как характер распределения более $5,2 \times 10^{-6}$ более соответствует характеру распределения нефелинового сиенита, доказывая, что нефелиновый сиенит является высокорadioактивным. Арфведсонит-люаврит, связанный с редкоземельно-урановой минерализацией, богат высокорadioактивными элементами, как U и Th. Региональный комплекс песчаников состоит в основном из полевошпатового кварцита и содержит радиоактивные минералы, которые подверглись низкотемпературно-высокотемпературному метаморфизму и, таким образом, демонстрируют термические аномалии. С помощью теплового инфракрасного диапазона Landsat можно эффективно различать разницу температур поверхности и, таким образом, определять области с радиотермическими аномалиями.

Полоса Landsat TIRS 10 использовалась для инверсии температуры поверхности с использованием метода RTE. Тепловые аномалии в исследуемом районе были в основном сосредоточены в юго-центральной части исследуемого района, где общая температура поверхности была низкой, а средняя температура поверхности летом колебалась от 5° до 16° , при этом самые высокие значения температуры поверхности достигали 28° в некоторых районах. Среди них есть три типичных высокотемпературных области (рис. 134): L1, L2 и L3 (таблица 21).

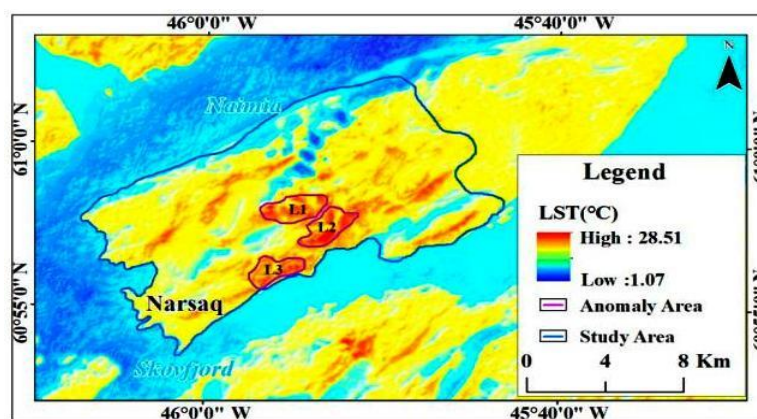


Рисунок 134. Карта инверсии температуры поверхности.

Табл. 21. Приземные температуры в зонах термических аномалий.

Abnormal Area	Maximum Surface Temperature	Minimum Surface Temperature	Average Surface Temperature
L1	28.51	15.70	23.85
L2	27.08	14.59	22.76
L3	26.32	16.64	23.24
Study area	28.51	1.07	16.85

Все три термальные аномалии расположены вблизи южной рифтовой зоны, а литология высокотемпературной области в основном состоит из щелочных пород науяита и арфведсонита луяврита; руда типа арфведсонита сопровождается ураном, торием и другими элементами с очевидными радиоактивными аномалиями. Тепловые аномалии демонстрировали сильную корреляцию как с разломами, так и с литологией, что дополнительно предполагает, что аномалии температуры поверхности указывают на минерализацию. Были собраны радиометрические данные - общее гамма-излучение урана, концентрация урана (ppm) и концентрация тория (ppm) (рис. 135).

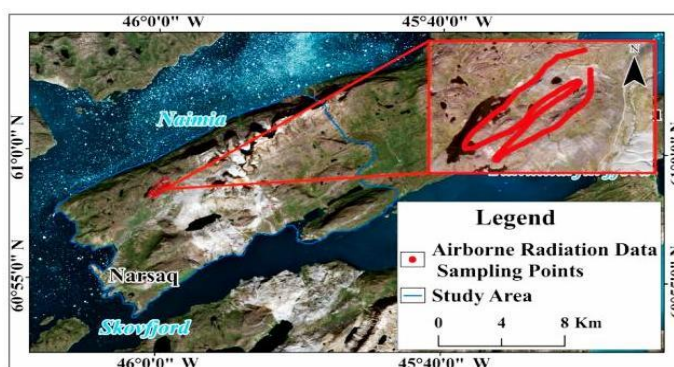


Рис. 135. Карта точек отбора проб для данных о воздушном излучении.

Корреляция между этими данными и данными инверсии температуры поверхности была проанализирована с использованием коэффициента корреляции Спирмена, и было обнаружено, что тепловые аномалии (таблица 22) положительно коррелируют с общим гамма-излучением урана, содержаниями урана и тория с коэффициентами корреляции 0,63, 0,60 и 0,65 соответственно.

Табл. 22. Корреляции между термическими аномалиями и радиоактивными элементами.

Types	Spearman's Correlation Coefficient
Total uranium gamma radiation	0.63
U ppm	0.60
Th ppm	0.65

Это также указывает на то, что температурные аномалии поверхности указывают на присутствие радиоактивных элементов.

Минерализация в исследуемом районе в основном связана с луявритом, где черный, плотный, мелкозернистый арфведсонит-луяврит образует арфведсонит-руды, а минерализация - редкоземельные элементы и уран, содержатся в парагенетических минералах, образованных в результате охлаждения и кристаллизации магмы. Исследования показали, что минерализация включает стеенструпин, селенопатит, содалит фосфат церия,

монацит, минералы силиката циркония и др. Выявлено 13 минералов, среди которых наиболее важными редкоземельными минералами являются стинструпин (5,58%), за которым следуют монацит (0,09%) и фосфорит натрия, которые часто встречаются в агломератах и содержат связанные с ними уран, торий и другие элементы. Идентифицируя радиоактивный луаврит с помощью дистанционного зондирования, можно эффективно отследить целевую область минерализации.

Исследуемая область была разделена на 67 243 единицы анализа в соответствии с 10-метровыми пиксельными единицами. Многослойные растровые данные были импортированы для расчета с использованием программного обеспечения для анализа географической информации ArcGIS. Были отобраны четыре основных элемента весомости доказательств, которые включали литологическую классификационную информацию SVM machine learning, тектоническую информацию, информацию о гидротермальных изменениях PCA и информацию о поверхностных тепловых аномалиях. Комплексные оценочные значения, соответствующие четырем элементам доказательств, были рассчитаны с помощью априорного вероятностного анализа, включенного в метод взвешивания доказательств (табл. 23).

Табл. 23. Статистические параметры для бинаризации слоев доказательств.

Evaluation Index Layer	W ⁺	$\sigma(W^+)$	W ⁻	$\sigma(W^-)$	C	SI	W
Thermal anomalies	4.44	1.05	-0.82	0.38	5.26	4.69	4.44
SVM	4.33	1.06	-0.68	0.36	5.01	4.47	4.33
Hydrothermal alteration	3.35	1.15	-0.20	0.28	3.55	2.98	3.35
Structural density	0.59	0.30	-1.07	0.58	1.67	2.52	0.59

Была сгенерирована окончательная карта благоприятных областей минерализации (рис. 136).

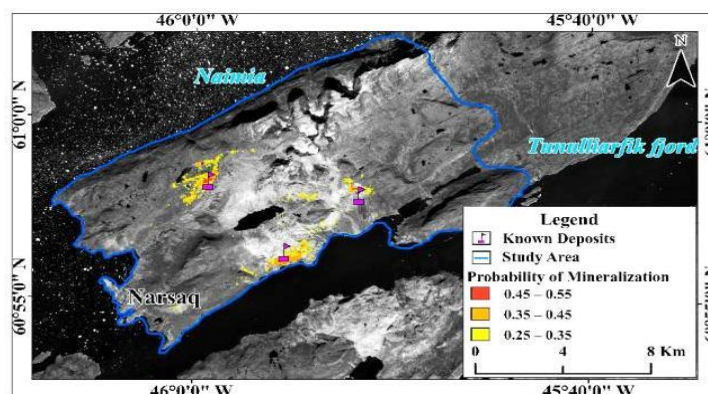


Рис. 136. Карта потенциального оруденения (базовое изображение выполнено с помощью панхроматического диапазона Sentinel-2).

Область высокой вероятности минерализации на карте в основном охватывает литологии луаврита и науайита. Преобладают щелочные изменения, обогащающие радиоактивные минералы в низкотемпературных областях. Среднее значение температурных аномалий в прогнозируемой области составляет 23,24 °C (рис. 137).

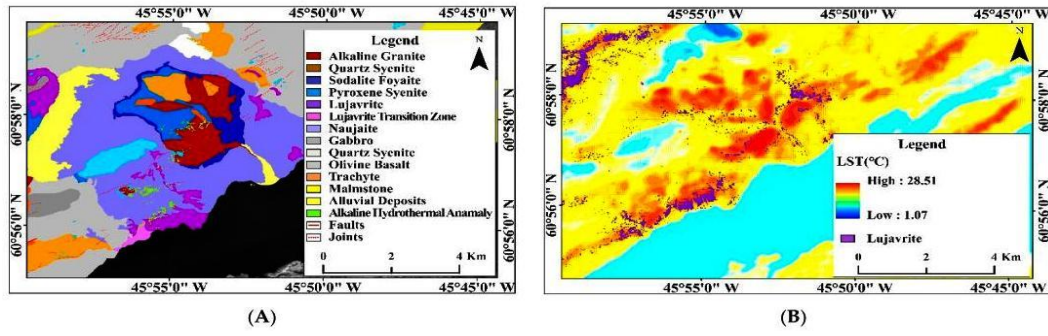


Рис. 137. (А,В) Карта анализа целевой области поиска.

5.9 Методика обработки ДДЗ при поисках бокситов в риголите (Индия)

С реголитом связано образование многих вторичных и гипергенных руд, особенно бокситов. Большинство этих латеритных реголитов имеют геоморфологический контроль. Возможности дистанционного зондирования, такие как синоптический обзор, мультиспектральная и гиперспектральная съемки, делают метод эффективным инструментом выделения перспективных районов для ГРР. Гиперспектральное зондирование использует от 100 до 200 смежных спектральных полос для записи полного и непрерывного спектра для каждого пикселя изображения. Для некоторых типов минералов (рис. 138) спектральные кривые являются диагностическими. Гиперспектральное зондирование позволяет идентифицировать и картировать в первую очередь особенности реголита и его гидротермальных и др. изменений.

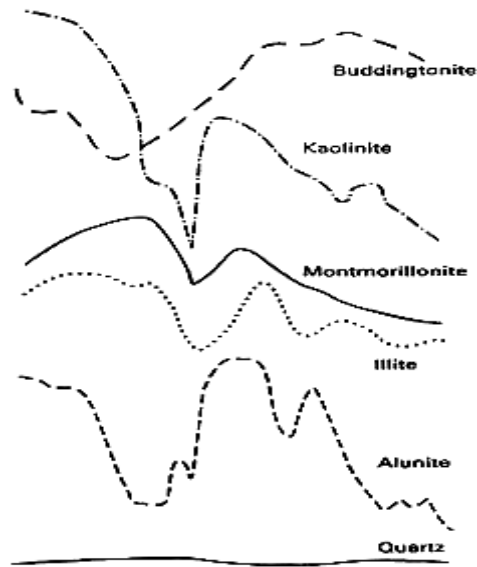


Рис. 138. Спектральные кривые отражения для некоторых минералов гидротермальных изменений.

Геоморфологическое картирование является основным методом поисков бокситовых месторождений на основе ДДЗ. Месторождения бокситов обычно образуются в тропических климатических условиях в процессе латритизации/бокситизации и, следовательно, возникают в виде больших покровов. Бокситы могут быть образованы из любой богатой алюминием породы, возраст которой варьирует от архейского до современного. Выделение благоприятных форм рельефа является одним из важных параметров моделирования бокситового оруденения.

Зоны среднего инфракрасного диапазона наиболее эффективны для интерпретации аномалий, связанных с минерализацией бокситов. Анализ спектральных характеристик латерита/боксита по отношению к другим характеристикам, таким как растительность и латеритная красная почва, показывает, что в спектральном диапазоне от 2,08 до 2,35 мкм (диапазон ТМ-7) растительность дает низкий коэффициент отражения, а латерит/боксит

дает высокий коэффициент отражения. С использованием моделирования спектрального смещения месторождения бокситов были обнаружены в районе Ориссы в Восточной Индии. Так минералы, связанные с минерализацией бокситов, как гиббсит или диаспор, были идентифицированы, а территория была классифицирована по перспективности оруденения.

Были использован ряд методов обработки ДДЗ для анализа гиперспектральных изображений. Доступны различные методики анализа гиперспектральных изображений, в том числе «анализ всего пикселя», «подгонка спектральных характеристик», «преобразователь спектрального угла», «линейное спектральное несмешивание», «согласованная фильтрация» и др. Во всех методиках пиксельного анализа проверяется спектральное сходство между пиксельным и целевым спектрами, чтобы определить, присутствует ли один или несколько целевых объектов в каждом пикселе гиперспектрального изображения.

Подгонка спектральных характеристик - это согласование эталонных и пиксельных спектров путем изучения специфических характеристик поглощения в спектрах. В этом методе определяется диапазон длин волн, в пределах которого существует уникальная характеристика поглощения для выбранной цели. Затем глубина и форма спектров пикселей изображения сравниваются с эталонным целевым спектром с использованием метода наименьших квадратов. Спектры минералов USGS, связанных с бокситами, представлены на рисунке 139.

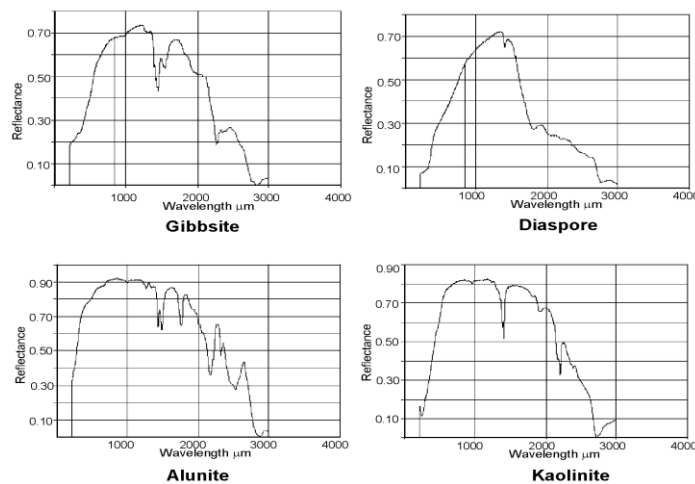


Рис. 139. Минеральные спектры USGS для некоторых минералов, связанных с бокситами.

Другим наиболее широко используемым методом является «Spectral Angle Mapper» (SAM), который представляет собой метод классификации, позволяющий быстро отображать изображения путем вычисления спектрального сходства между спектрами изображения и эталонными спектрами. Метод измеряет спектральное подобие, вычисляя угол между опорным спектром и спектром пикселей изображения, рассматривая их как векторы в n-мерном пространстве. Чем меньше спектральный угол, тем более похожи

пиксельный и эталонный спектры. На метод не влияют факторы солнечного освещения, потому что угол между двумя векторами не зависит от длины векторов. Для спектральной обработки гиперспектральных данных с использованием SAM выбор чистых пикселей является наиболее важным шагом. Чистые пиксели - это пиксели, которые представляют один объект и также называются «конечными элементами», потому что они лежат на концах облаков данных при проецировании в многомерное пространство данных. Чистые пиксели определяются с помощью индекса чистоты пикселей (PPI), который является средством обнаружения наиболее «спектрально чистых» (крайних) пикселей в гиперспектральных изображениях. Создается «изображение с чистотой пикселей», в котором DN каждого пикселя соответствует количеству раз, когда этот пиксель был записан как экстремальный.

Подпиксельный анализ может обнаруживать цель, намного меньшую, чем размер самого пикселя. «Линейное спектральное расслоение» - один из таких методов спектрального «рассмешивания», который основан на теории, согласно которой спектр отражения любого пикселя является результатом линейных комбинаций спектров всех конечных элементов внутри этого пикселя. Линейную комбинацию можно рассматривать как средневзвешенную, где вес каждого конечного элемента прямо пропорционален площади пикселя, содержащего этот конечный элемент. Если спектры всех конечных элементов известны, то их содержание в каждом пикселе можно рассчитать на основе спектра каждого пикселя. Несмешивание решает набор из n линейных уравнений для каждого пикселя, где n - количество полос в изображении. Незвестные переменные в этих уравнениях - это доли каждого конечного члена в пикселе. Результаты Linear Spectral Unmixing включают по одному изображению изобилия для каждого конечного члена. Значения пикселей в этих изображениях указывают процент пикселя, состоящего из этого конечного элемента. Например, если пиксель в изображении изобилия для гиббсита конечного члена имеет значение 0,80, то 80% площади пикселя содержит гиббсит.

Метод анализа гиперспектрального изображения, аналогичный спектральному несмешиванию, при котором отображаются только выбранные пользователем цели, называется согласованной фильтрацией. Для точного анализа не всегда требуется выяснять спектры всех конечных элементов. Согласованная фильтрация больше подходит для вычисления объектов, которые относительно редко встречаются, таких как некоторые минералы при поисках бокситов. Согласованная фильтрация «фильтрует» входное изображение на предмет хороших совпадений с выбранным целевым спектром, максимизируя отклик целевого спектра в данных и подавляя отклик всего остального - неизвестного фона. Одна потенциальная проблема с согласованной фильтрацией

заключается в том, что в конечном итоге возможны ложноположительные результаты. Чтобы исправить это, дополнительная мера, называемая «неосуществимостью», рассчитывается на основе статистики как шума, так и изображения и указывает степень, в которой результат согласованной фильтрации является возможным сочетанием цели и фона.

ИСТОЧНИКИ:

1. *Busheng Xie, Lixin Wu, Wenfei Mao, Shengyu Zhou and Shanjun Liu. Minerals 2022, 12.*
2. *Hatem Aboelkhair, Ahmed Abdelhalim, Zakaria Hamimi & Majid Al-Gabali. Arabian Journal of Geosciences 2020.*
3. *K.Amin. Mineral Exploration Sector, Egyptian Mineral Resource and Geological Survey Authority. 2022.*
4. *Li He, Pengyi Lyu, Zhengwei He, Jiayun Zhou, Bo Hui, Yakang Ye, Huilin Hu, Yanxi Zeng and Li Xu. Minerals 2022.*
5. *M. Abdolmalek, T.M. Rasmussen, M.K. Pal. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXIV ISPRS Congress 2020.*
6. *Masoumeh Alimohammadi, Saeed Alirezai, Daniel J. Kontak. Ore Geology Reviews (2015)*
7. *Mehdi Honarmand and Hadi Shahriari. Minerals. 2021, 11.*
8. *Mohamed Abd El-Wahed, Basem Zoheir, Amin Beiranvand Pour and Samir Kamh. Minerals 2021, 11.*
9. *Tarun Verma, Maneeb Masood, Charchit Jain. Department of Mining Engineering, Indian Institute of Technology (BHU), India. 2021.*
10. *Vahid Khosravi, Aref Shirazi, Adel Shirazy, Ardeshir Hezarkhani and Amin Beiranvand Pour. Mining 2022, 2.*
11. *Y.V.N. Krishnamurthy & G. Sreenivasan. Regional Remote Sensing Service Centre Indian Space Research Organization. 2005.*