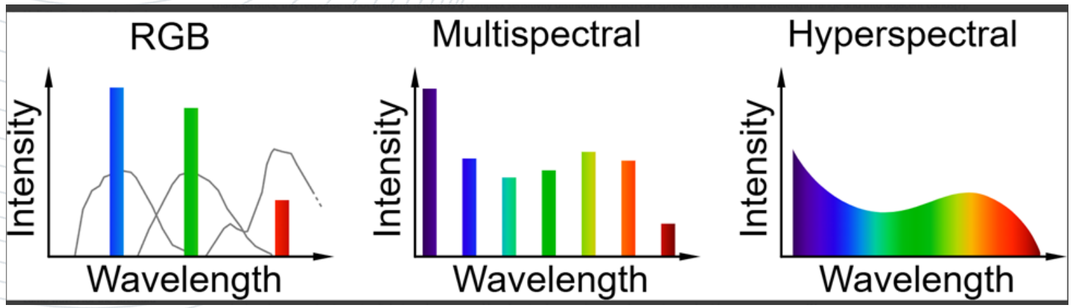
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ: ОТ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ К ТОЧЕЧНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

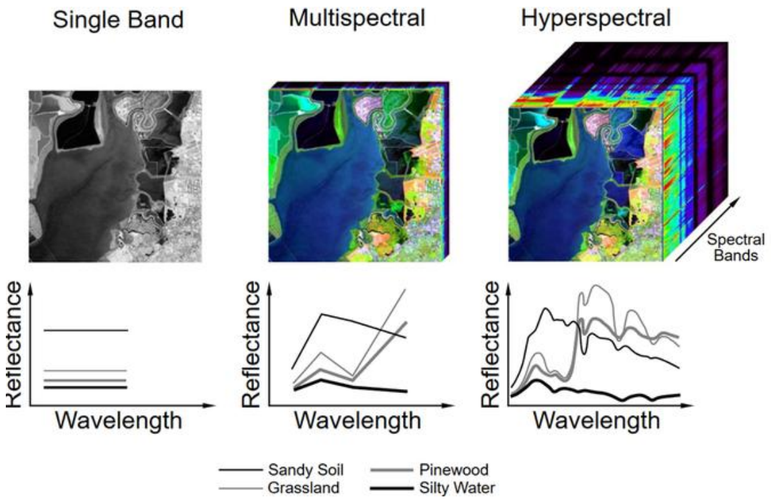
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Болсуновский Михаил Александрович

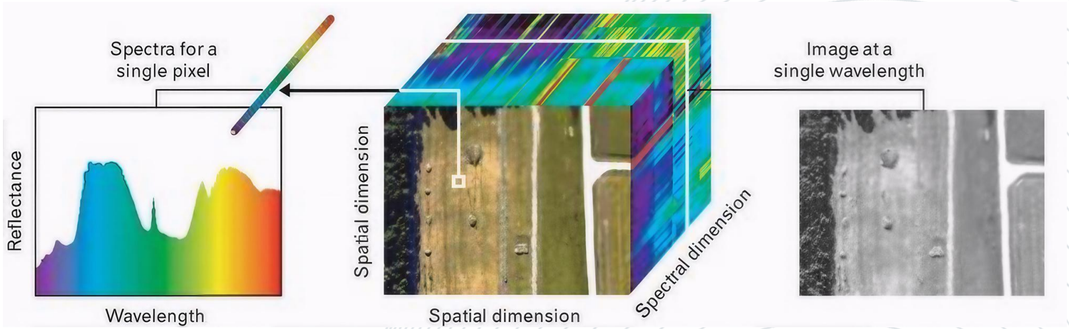
ЧТО ТАКОЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА?



Гиперспектральное зондирование - это технология дистанционного зондирования, широко используемая для мониторинга различных процессов. Этот подход включает в себя захват отраженного света в сотнях узких спектральных полос. По сравнению с мультиспектральными системами, гиперспектральные камеры обеспечивают высоко детализированную спектральную информацию для каждого пикселя в изображении. Это повышенное спектральное разрешение позволяет более точно различать здоровую и больную растительность, а также различные виды растений.



Примеры типов спектральных изображений



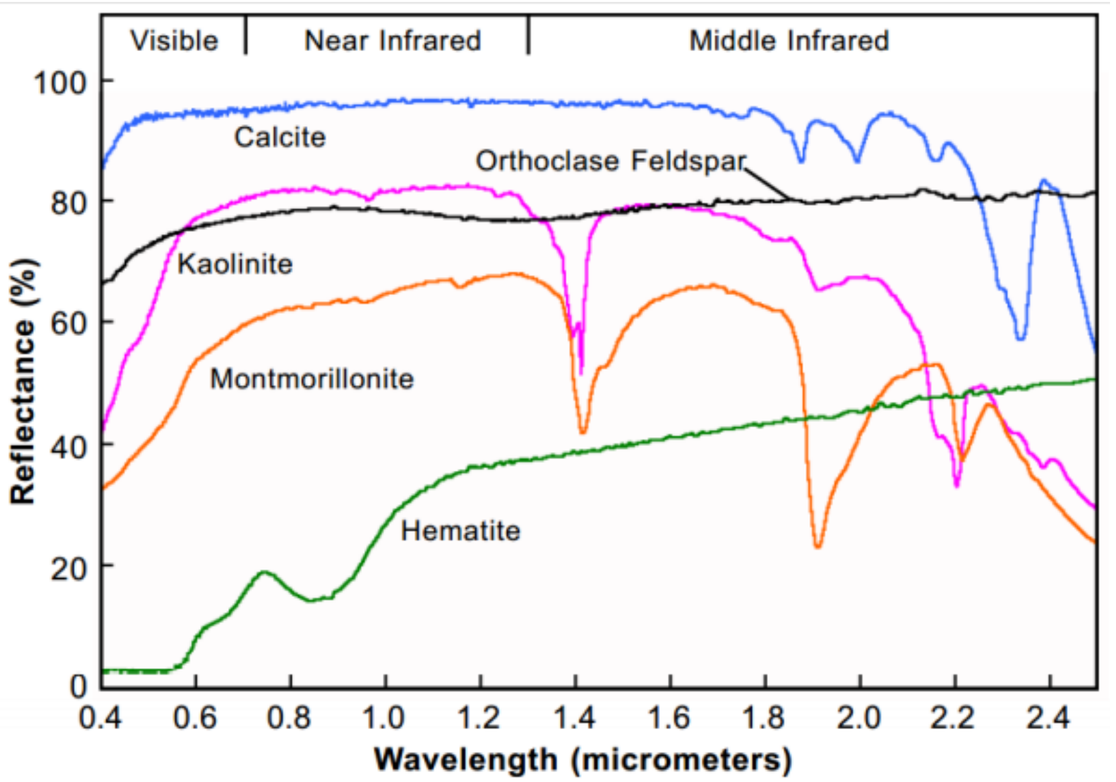
Пространственные и спектральные характеристики гиперспектральных данных

ПОЧЕМУ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА?

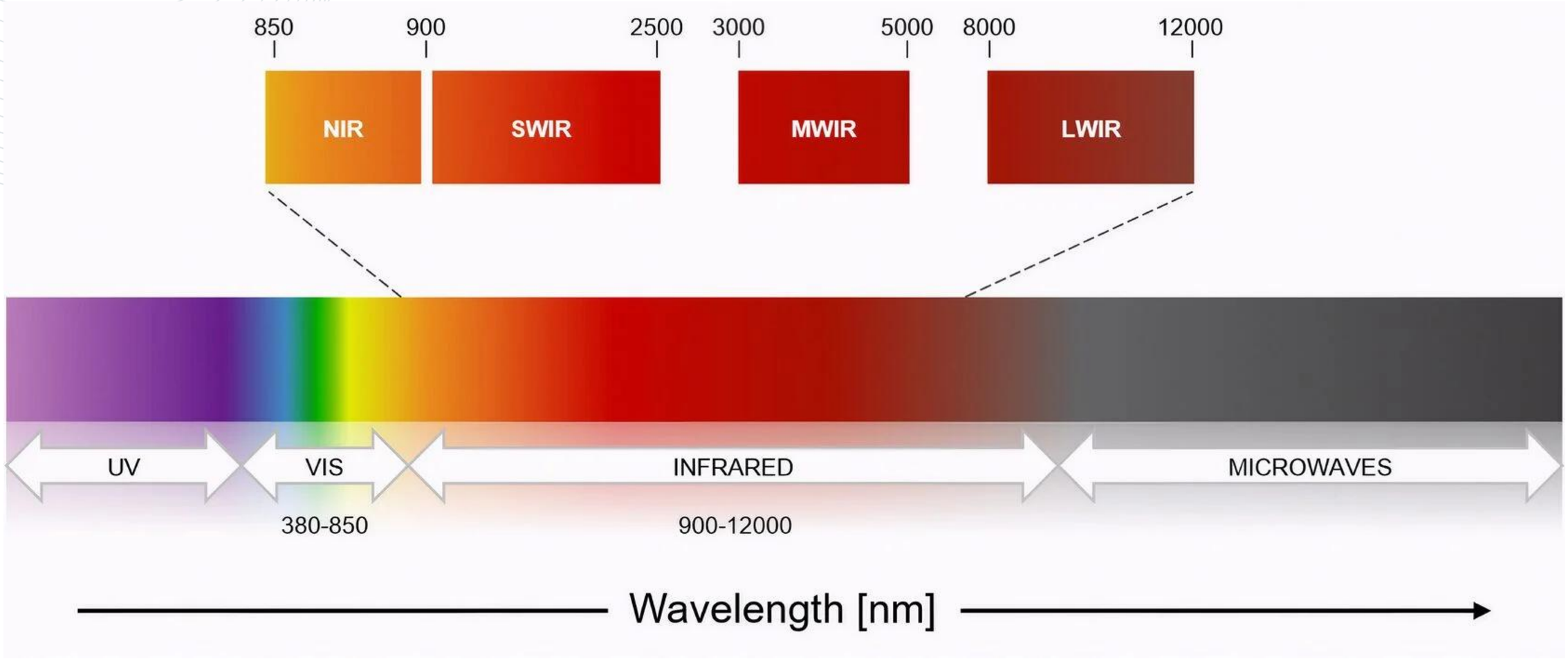
ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ ТРЕБУЮТ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ И ФИНАНСОВЫХ ЗАТРАТ. ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА ПОЗВОЛЯЕТ ЭФФЕКТИВНО ЛОКАЛИЗОВАТЬ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УЧАСТКИ ДО НАЧАЛА НАЗЕМНЫХ РАБОТ.

Основные тезисы:

- Минералы и горные породы имеют диагностические спектральные полосы поглощения в диапазоне 400–2500 нм
- Гиперспектральные сенсоры регистрируют сотни узких спектральных каналов
- Возможность идентификации конкретных минералов, а не просто зон изменения
- Ключевое преимущество: переход от качественного анализа к количественному



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ – СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДИАПАЗОНЫ



РАСШИФРОВКА ДИАПАЗОНОВ

Диапазон	Длины волн	Что детектирует
VNIR	400–1000 нм	Оксиды и гидроксиды железа (гематит, гётит), некоторые цветные минералы (малахит).
SWIR	1000–2500 нм	Глины, слюды, хлорит, карбонаты, сульфаты, амфиболы, эпидот, апатит.
LWIR	8–12 мкм (7500–12000 нм)	Кварц, полевые шпаты, флюорит, барит, многие силикаты.
Косвенно	—	Сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит), золото, самородные металлы.

МИНЕРАЛЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

Минерал	Тип руд	Распространённость	Диапазон	Обоснование / Примечание
Кварц	окисленные / первичные	широко	LWIR	Силикат, диагностируется в LWIR (8–12 мкм). В SWIR не имеет диагностических пиков.
Полевые шпаты	окисленные	широко	LWIR	Тектосиликаты, диагностируются в LWIR.
Гидрослюды	окисленные / первичные	широко	SWIR	Слюды (серицит, мусковит) имеют сильные OH-пики в SWIR (2200 нм).
Каолинит	окисленные	широко	SWIR	Глинистый минерал, двойной пик в SWIR (2160 и 2206 нм).
Монтмориллонит	окисленные	широко	SWIR	Глинистый минерал, OH-пики в SWIR (~2200–2250 нм).
Гётит	окисленные	широко	VNIR	Гидроксид железа, Fe^{3+} – пик в VNIR (~480–500 нм).
Гидрогётит	окисленные	широко	VNIR	Аналогично гётиту, Fe^{3+} – VNIR.
Гематит	окисленные / первичные	широко	VNIR	Оксид железа, Fe^{3+} – пик ~550–900 нм.
Ярозит	окисленные	широко	SWIR	Сульфат с OH-группами, диагностические пики в SWIR (~2265 нм).
Золото	окисленные	широко	косвенно	Не имеет диагностических пиков в VNIR/SWIR/LWIR. Детектируется по ассоциации с пиритом, арсенопиритом, ярозом, гематитом.
Пирит	окисленные / первичные	мало / широко	косвенно	Не имеет диагностических пиков. Детектируется по отсутствию спектральных признаков на фоне вмещающих пород или по зонам окисления (гётит).
Арсенопирит	окисленные / первичные	мало / широко	косвенно	Не имеет диагностических пиков. Ассоциирует с гидротермальными минералами (серицит, хлорит).
Магнетит	окисленные	мало	VNIR	Оксид железа Fe^{3+}/Fe^{2+} – слабые пики в VNIR, но часто низкое отражение.
Сфалерит	окисленные	редкие	косвенно	Сульфид, не имеет пиков. Детектируется по ассоциации с карбонатами или гидротермальными минералами.
Халькопирит	окисленные	редкие	косвенно	Сульфид, не имеет пиков. Зоны окисления дают малахит, азурит (VNIR).
Малахит	окисленные	редкие	VNIR	Карбонат меди (Cu^{2+}) – зелёный, имеет пики в VNIR (~600–700 нм).
Антимонит (антионит)	окисленные	редкие	косвенно	Сульфид сурьмы, не имеет пиков. Ассоциирует с кварцем, карбонатами (SWIR/LWIR).
Карбонаты (кальцит, доломит, магнезит)	окисленные / первичные	мало / широко	SWIR / MWIR	CO_3-группа имеет пики в SWIR (2300–2350 нм) и MWIR (2800–5400 нм).
Хлорит	первичные	широко	SWIR	Fe-Mg филлосиликат, OH-пик ~2250–2260 нм.
Серицит	первичные	широко	SWIR	Мелкочешуйчатая слюда, OH-пик ~2200–2220 нм.
Углерод (органический / графит)	окисленные / первичные	широко	все	Сильное поглощение во всём диапазоне (очень тёмный). Детектируется по низкому отражению.
Гидрохлориты	первичные	широко	SWIR	Разновидность хлорита с OH-группами, пик ~2250 нм.
Флюорит	первичные	мало	LWIR	CaF_2, имеет пики в LWIR (~9–11 мкм).
Гипс	окисленные / первичные	мало	SWIR	Сульфат с H_2O, сильные пики в SWIR (1750, 2200, 2400 нм).
Барит	окисленные / первичные	мало	SWIR / LWIR	$BaSO_4$ – пики в SWIR (~2175 нм) и LWIR.
Эпидот	окисленные / первичные	мало / редкие	SWIR	Силикат с OH-группами, пик ~2250–2350 нм.
Гранат	первичные	редкие	SWIR	Некоторые гранаты (например, альмандин) имеют слабые пики в SWIR (~2200–2300 нм).
Апатит	окисленные / первичные	мало / редкие	SWIR / LWIR	Фосфат с OH-группами – пики в SWIR (~2000–2200 нм) и LWIR.
Роговая обманка	окисленные	мало	SWIR	Амфибол с OH-группами, пик ~2300–2350 нм.
Пироксен	окисленные	мало	SWIR	Некоторые пироксены имеют Fe^{2+} пики в VNIR и OH-пики в SWIR (редко).
Нонтронит	окисленные	редкие	SWIR	Fe-смектит, OH-пики ~2250–2300 нм.
Галлуазит	окисленные	редкие	SWIR	Глинистый минерал, аналогичен каолиниту (пики ~2200 нм).
Диннит	окисленные	редкие	?	Редкий минерал, данных нет. Возможно, силикат или глина – предположительно SWIR.
Пирротин	первичные	широко	косвенно	Сульфид, не имеет пиков. Детектируется по зонам окисления.
Марказит	первичные	мало	косвенно	Полиморф пирита, аналогично.
Мельниковит-пирит	первичные	мало	косвенно	Тонкодисперсный пирит, без спектральных пиков.
Галенит	первичные	редкие	косвенно	Сульфид свинца, без пиков.
Блеклая руда (теннантит/тетраэдрит)	первичные	редкие	косвенно	Сульфосоли, без пиков.
Самородный висмут	первичные	редкие	косвенно	Металл, без пиков.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ – ОТ LANDSAT К ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ СЕНСОРАМ

• 1972: Запуск спутника **Landsat-1** (тогда ERTS-1). Хотя это был лишь 4-канальный мультиспектральный сканер, именно он стимулировал развитие спектральных методов в геологии и заложил основу для гиперспектральных технологий.
• Конец 1970-х: Начало активного развития гиперспектральной съемки в геологии. Ученые начали осознавать ограничения мультиспектральных данных и потребность в более детальной спектральной информации для точного определения минералов.

1980-е: Зарождение и первые полеты (Авиация)
• 1983: Создание первого авиационного гиперспектрального сенсора **AIS (Airborne Imaging Spectrometer)** в Лаборатории реактивного движения (JPL) NASA. Это стало отправной точкой для технологии.
• Конец 1980-х: Появление первого коммерческого авиационного гиперспектрального прибора **CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager),** производство которого началось в Канаде.

1990-е – 2000-е: Выход в космос и расцвет программ
• 2000: 21 ноября состоялся исторический запуск первого космического гиперспектрального спутника — NASA's **Earth Observing-1 (EO-1) с сенсором Hyperion**. Hyperion работал в 220 спектральных каналах (0.4–2.5 мкм) с разрешением 30 м, проработав до 2016 года и в 7 раз превысив свой расчетный срок службы.
• 2009: В NASA началась разработка следующего поколения авиационного сенсора — **AVIRIS-NG (Next Generation)** с улучшенными характеристиками.

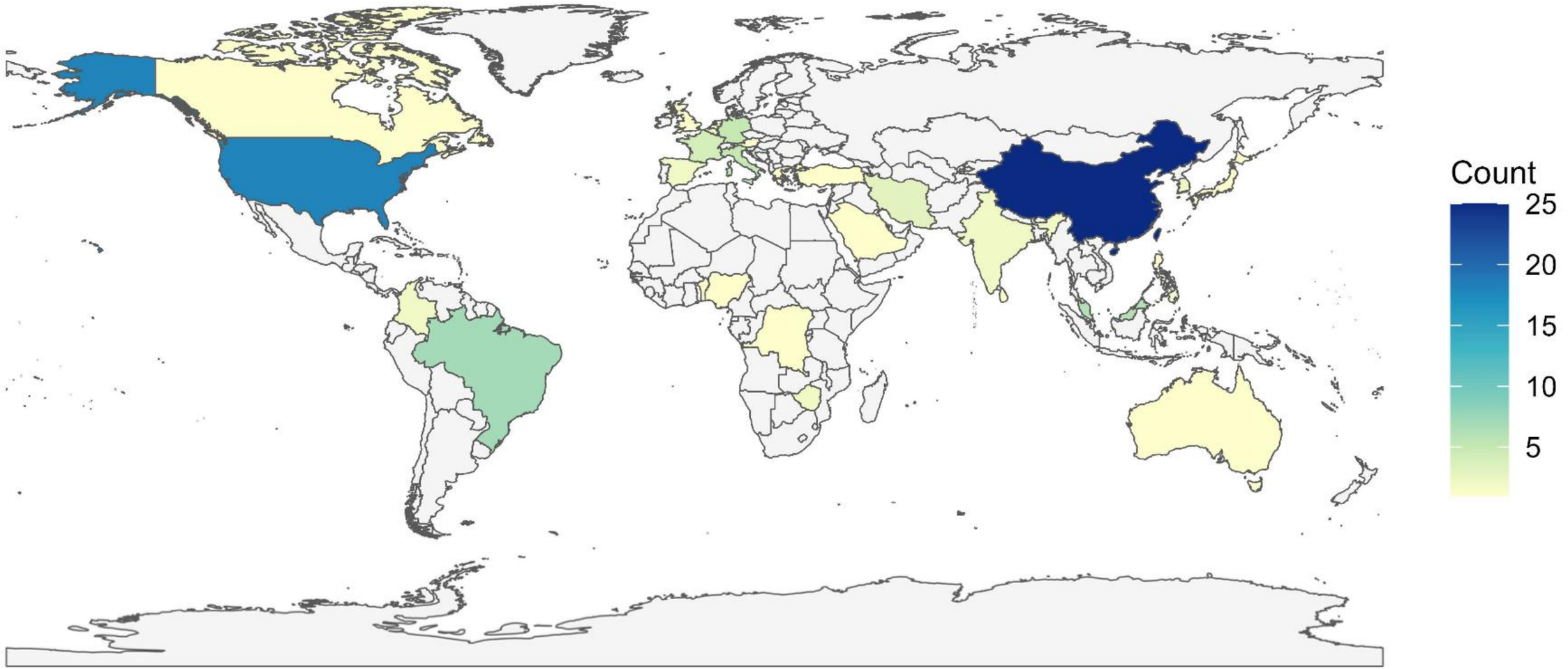
2018 - 2019:
• Запуск китайского спутника **GF-5** с гиперспектральным сенсором AHSI (330 каналов, 400–2500 нм, 30 м разрешение) и **ZY-1 02D** (166 каналов, 400–2500 нм, 30 м разрешение).

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ – ОТ LANDSAT К ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ СЕНСОРАМ

2020-е: Развитие гиперспектральных систем и интеграция с ИИ

2020	Начало коммерциализации **лёгких гиперспектральных сенсоров для БПЛА** (вес менее 1000 г), что сделало технологию доступной для локальной геологоразведки.
2021	Запуск европейского спутника **PRISMA** — первый европейский космический гиперспектральный сенсор с разрешением 30 м и 239 каналами.
2022	Запуск немецкого **EnMAP** — 242 спектральных канала, разрешение 30 м.
2023	Начало регулярного предоставления данных с японского спутника **HISUI** в открытом доступе для геологических задач (запущен в 2019).
2024	16 августа — запуск первого гиперспектрального спутника компании **Planet Labs — Tanager-1**, созданного в партнёрстве с Carbon Mapper Coalition и NASA JPL. Данные получены в 420 спектральных каналах с разрешением 30 метров.
2024	Развёртывание группировки **Pixxel Firefly** из шести спутников (разрешение 5 м, >150 спектральных каналов).
2024	Первые публикации по использованию **нейросетевых архитектур** (трансформеры, свёрточные сети) для обработки гиперспектральных данных с БПЛА в реальном времени.
2025	**Создание полностью автономных систем "дрон + ИИ" с бортовой обработкой данных для обнаружения минеральных аномалий.**

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕМЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ В МИРЕ



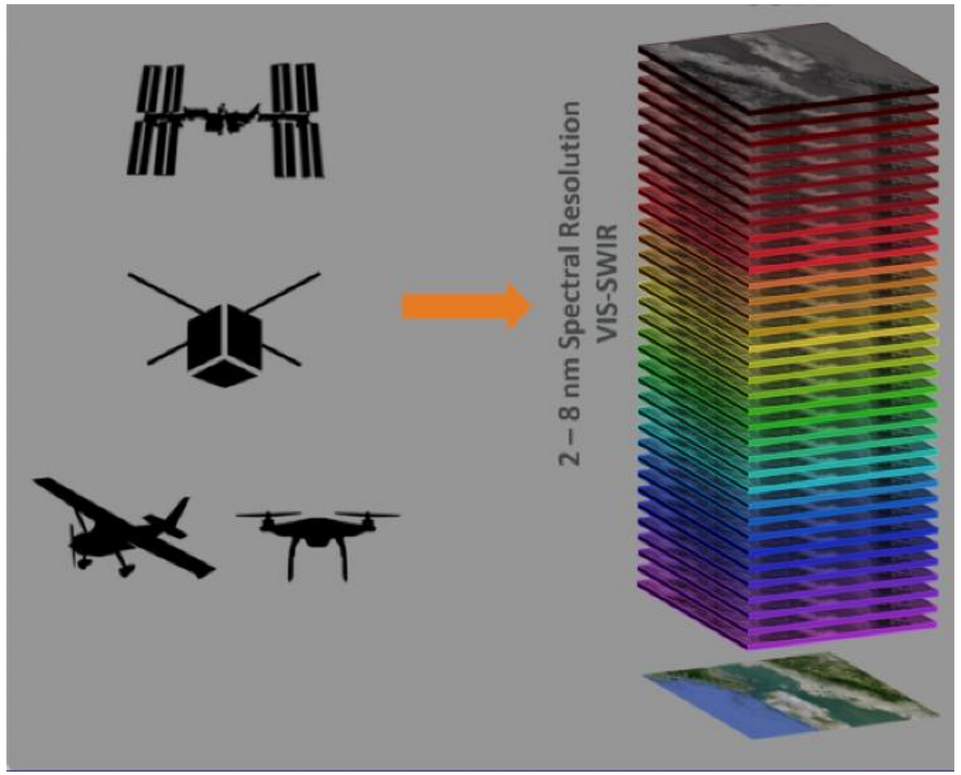
ОТ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ К ТОЧЕЧНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА (30 м)
- Landsat-8/9, Sentinel-2, ASTER
- Региональный скрининг (150-200 км²)
- Масштаб 1:100 000 - 1:50 000

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ КОСМОСЪЕМКА (30 м)
- ZY-1, GF-5 (при наличии)
- Детализация минералогии
- Масштаб 1:50 000

АВИАЦИОННАЯ СЪЕМКА (1-5 м)
- CASI/SASI или аналоги
- Картирование рудных полей
- Масштаб 1:10 000

СЪЕМКА БПЛА (0,1-1 м)
- FS-60, FS-62, FS-64, FS-6B или аналоги
- Картирование рудных полей
- Масштаб 1:2 000



ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ
- Спектрометрия, опробование
- Заверка и детализация

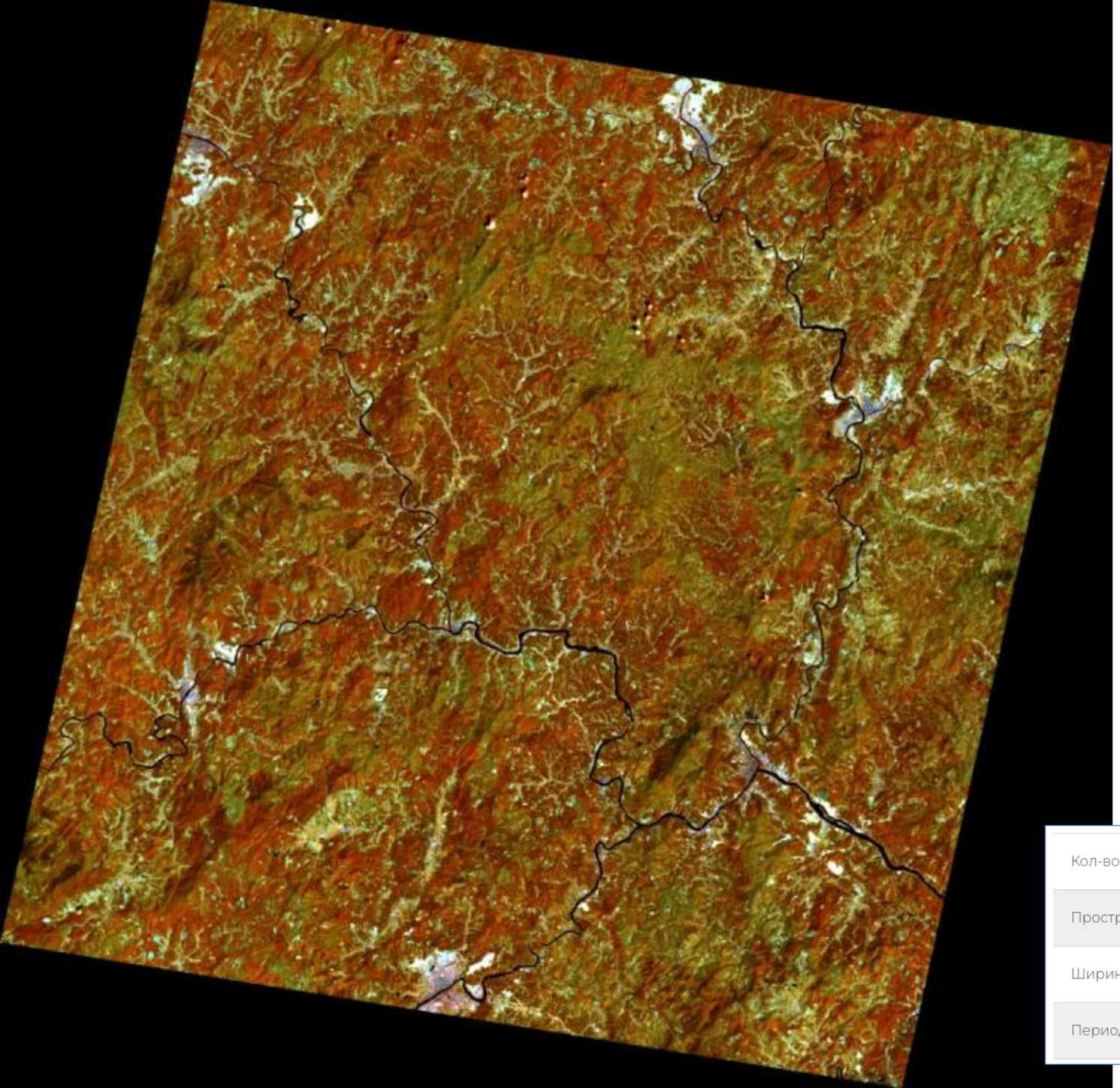
КОСМИЧЕСКИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (30 М РАЗРЕШЕНИЕ)

Современные космические платформы:

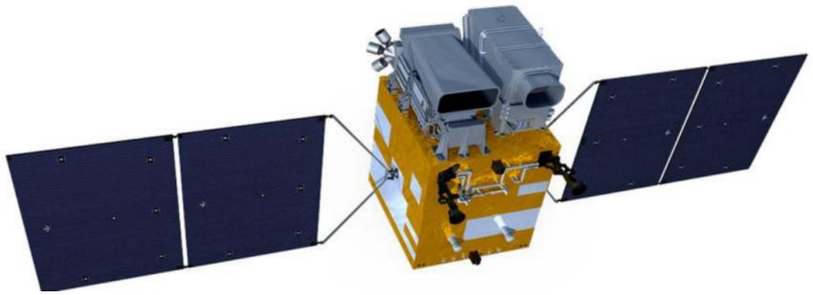
Преимущества космической съемки:

- Регулярное покрытие больших территорий
- Доступность (в т.ч. открытые архивы)
- Идеально для регионального скрининга

Сенсор	Спутник	Диапазон	Каналы	Разрешение	Особенности
AHSI	ZY-1 (Китай)	400-2500 нм	330	30 м	Широкий охват, регулярная съемка
AHSI	GF-5 (Китай)	400-2500 нм	330	30 м	Высокое соотношение сигнал/шум
EnMAP	Германия	420-2450 нм	244	30 м	Высокое качество данных (2015+)
Hyperion	EO-1 (исторический)	400-2500 нм	242	30 м	Пионер, выведен из эксплуатации



ZY Hyperspectral (ZY1-02D)



Космический аппарат ZY Hyperspectral (ZY1-02D) оснащен девяти диапазонной камерой и 166 канальной гиперспектральной камерой

Кол-во спектральных каналов	166
Пространственное разрешение, м	2.5 ,10, 30
Ширина полосы съемки, км	60
Период съемки, сутки	3



PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem)

Американская миссия NASA, сосредоточенная на изучении океана и атмосферы. PACE оснащена гиперспектральным датчиком Ocean Color Instrument II (OCI-II), который сможет детально исследовать состав атмосферы, включая распределение CO_2



EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program)

Немецкая программа гиперспектральной съемки, включающая в себя продвинутые методы обработки изображений. Запущен в апреле 2022 года.
EnMAP разработан для изучения земных экосистем, выявления загрязнённых территорий и мониторинга природоохранных зон. Собранные данные включают возможность анализа распространённости CO_2.



IASI (InfraRed Atmospheric Sounder Interferometer)

Датчик установлен на метеорологических спутниках EUMETSAT (MetOp-A/B/C series). IASI использует инфракрасную технологию для диагностики концентрации множества составляющих атмосферы, включая CO_2.



Sentinel-5P (Copernicus Programme)

Часть европейской системы наблюдения Земли Copernicus. Использует гиперспектральный инструмент TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), позволяющий измерять различные компоненты атмосферы, включая SO_2, NO_2, формальдегид и др., а также даёт представление о распределении CO_2.



Proba-V

Небольшой европейский спутник, оснащённый микроволновым радиометром VEGETATION и фотоприемником HRVLI, что позволяет наблюдать за динамическими процессами растительности и поверхностными характеристиками почвы.



MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission

Совместный франко-немецкий проект, нацеленный на мониторинг выбросов метана, а также концентрации CO_2. MERLIN оснащён лазерным дальномером для прямой фиксации парниковых газов.

PROXIMA


AIRBORNE SENSORS
RIEGL

АВИАЦИОННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (1-5 М РАЗРЕШЕНИЕ)

Типичные авиационные комплексы:

Преимущества авиационной съемки:

- Высокое пространственное разрешение (до 1 м)
- Возможность выбора оптимального времени съемки
- Детальное картирование рудных полей и флангов месторождений

Система	Диапазон	Каналы	Разрешение	Применение
CASI (VIS/NIR)	380-1050 нм	36	1 м	Вегетация, оксиды железа
SASI (SWIR)	950-2450 нм	101	2.2 м	Глинистые минералы, карбонаты, слюды
AVIRIS (NASA)	400-2500 нм	224	~4-20 м	Эталонное качество данных


Vision Datum

БЕСПИЛОТНЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (0,1-1 М РАЗРЕШЕНИЕ)









АВИАЦИОННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (1-5 М РАЗРЕШЕНИЕ)

Характеристика	FS-60 / FS-60C (VIS-NIR)	FS-62 / FS-62C (SWIR)	FS-6A (SWIR)	FS-64 / FS-64C (VIS-NIR+SWIR)
Основное назначение	Картографирование обнажённых пород, растительности, водных объектов	Поиск гидротермально изменённых пород и рудных минералов (глины, сульфаты, карбонаты)	Расширенный SWIR-анализ, поиск специфических гидротермальных минералов и руд	Детальное геологическое картирование, прямой и комбинированный анализ поверхности и минерального состава
Диапазон (тип)	400–1000 нм (видимый + ближний ИК)	900–1700 нм (коротковолновый ИК)	900–2500 нм (коротковолновый ИК)	400–1700 нм (VIS-NIR + SWIR)
Спектральное разрешение (FWHM)	2.5 нм	6.5 нм	≤10 нм	13–18 нм
Пространственное разрешение (пикселей)	1920	1280	≥640	1280
Количество спектральных каналов	~270	~120	~160	~100
Вес (камера)	≤840 г	≤740 г	нет данных	нет данных



МОБИЛЬНЫЕ И ПОРТАТИВНЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (0,1-1 М РАЗРЕШЕНИЕ)





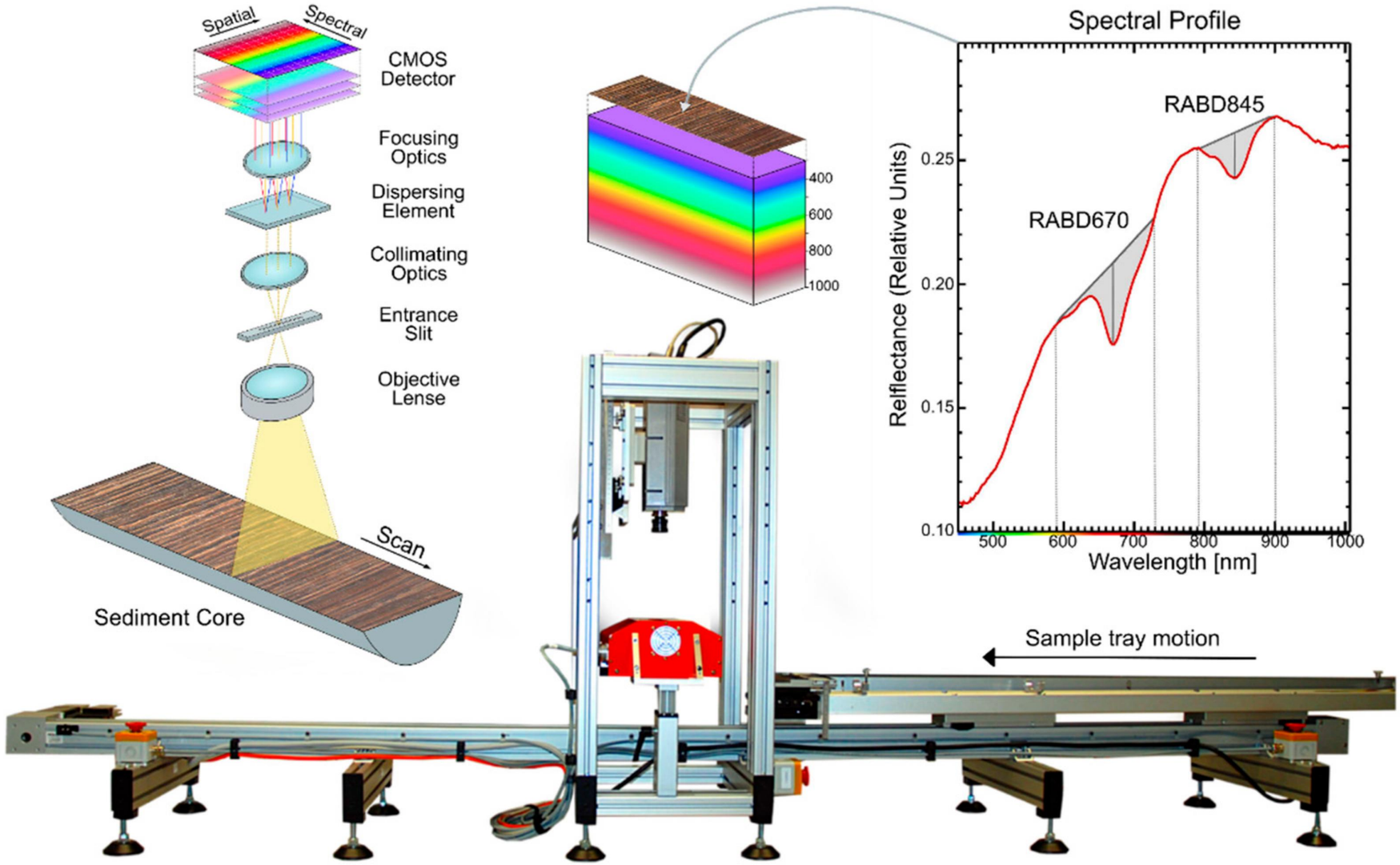




МОБИЛЬНЫЕ И ПОРТАТИВНЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (0,1-1 М РАЗРЕШЕНИЕ)

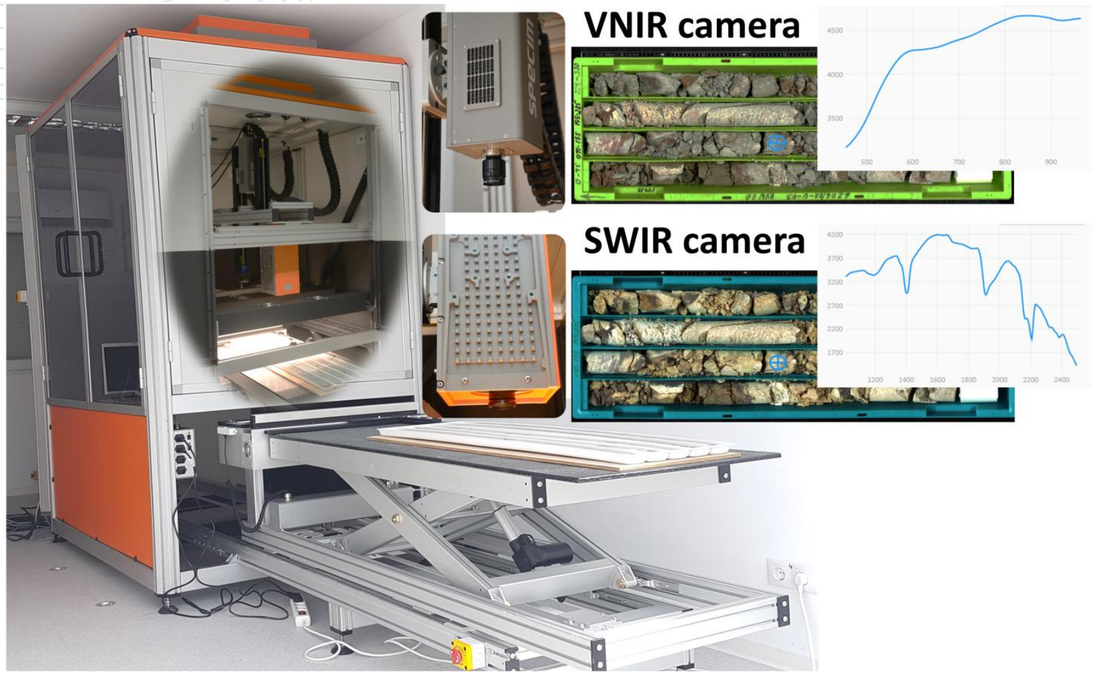
Характеристика	FS-23	FS IQ-VISNIR	FS IQ SWIR	FS-2A
Основное назначение	Анализ в видимом и ближнем ИК-диапазоне для изучения обнажённых пород, растительности, водных объектов	Портативная камера для полевых и лабораторных работ в видимом и ближнем ИК-диапазоне	Портативная камера для геологоразведки и промышленного контроля в коротковолновом ИК-диапазоне	Полноспектральный SWIR-анализ для детального поиска гидротермальных минералов и руд
Диапазон (тип)	400–1000 нм (видимый + ближний ИК)	400–1000 нм (видимый + ближний ИК)	900–1700 нм (коротковолновый ИК)	900–2500 нм (коротковолновый ИК)
Спектральное разрешение (FWHM)	2.5 нм	2.5 нм	6 нм	≤10 нм
Пространственное разрешение (пикселей)	1920×1920	1920×1920	1280×1280	≥640×640
Количество спектральных каналов	300	1200	1024	≥250
Вес (камера)	<2.8 кг	<2.8 кг	<2.8 кг	нет данных

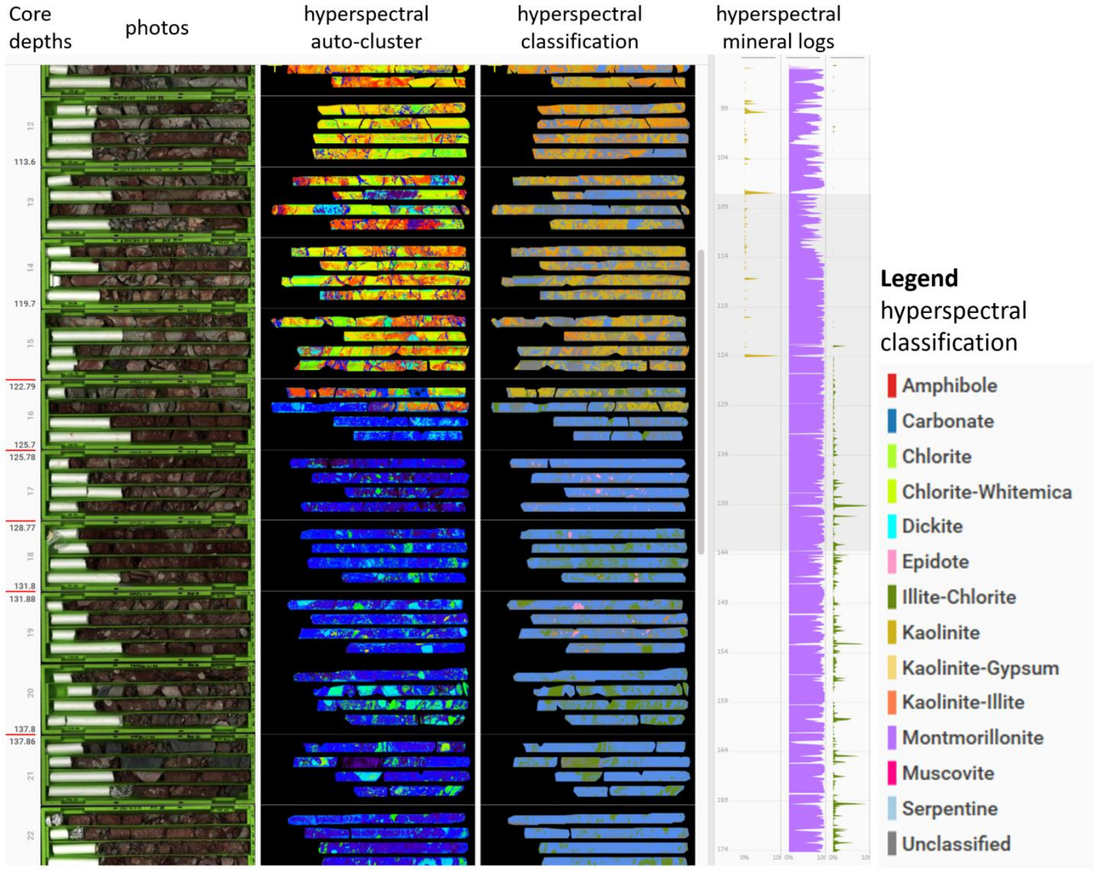
СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ КЕРНА



ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА НОРВЕГИИ (NGU): SPECIM SisuROCK

Мобильная лаборатория на базе SisuROCK. При этом в ее состав входят гиперспектральные камеры только VNIR и SWIR диапазонов





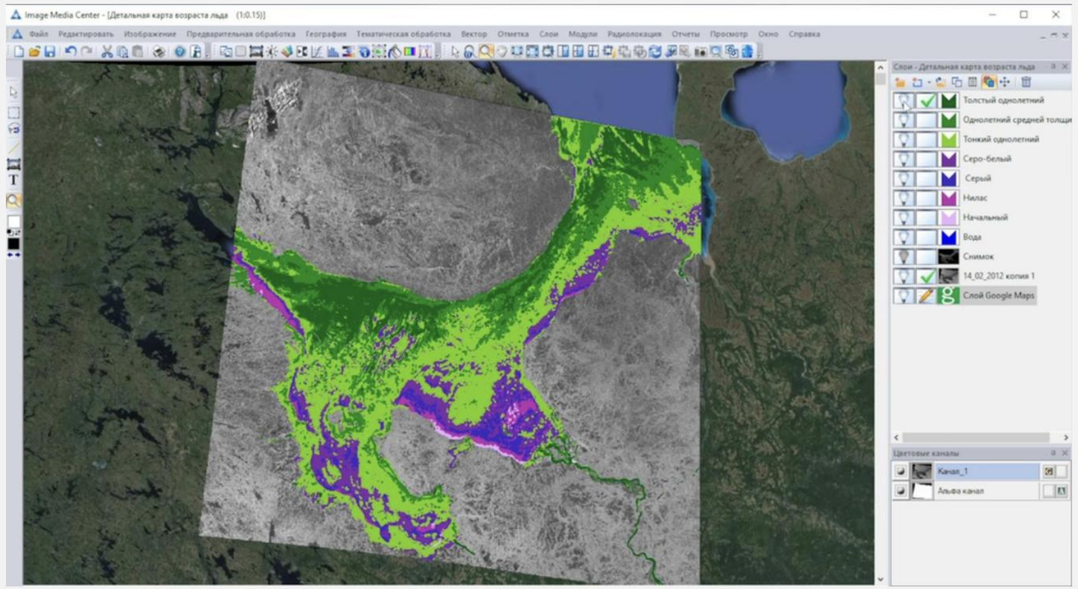
Гиперспектральные изображения керна, демонстрирующие фотографии ящиков с керном, изображения автоматической кластеризации гиперспектральных данных, классификацию минералов по гиперспектральным данным и получаемые на их основе гиперспектральные геологические колонки (слева направо: каолинит, монтмориллонит, хлорит), показывающие тренды изменения минерального состава по всей длине керна

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС PROXIMA HYPERSPECTRAL PROCESSOR

ОПТИВИСТА

Proxima Hyperspectral Processor — это современный программно-аппаратный комплекс, созданный для обработки и анализа гиперспектральных данных, полученных с помощью специализированных сенсоров.





ОСНОВНЫМ КОМПОНЕНТОМ КОМПЛЕКСА ЯВЛЯЕТСЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ КАМЕРА FS-23, КОТОРАЯ ОТЛИЧАЕТСЯ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ И ШИРОКИМ СПЕКТРОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ.

В ОСНОВЕ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА - IMC HYPERSPECTRAL, ЛЕЖАТ СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЧТО ПОЗВОЛЯЕТ ЭФФЕКТИВНО АНАЛИЗИРОВАТЬ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИВИСТА

ОПТИВИСТА

Характеристики программного обеспечения
Программная часть комплекса построена на основе современных технологий искусственного интеллекта, что позволяет эффективно анализировать гиперспектральные данные.

Форматы данных
Гиперспектральные форматы: поддержка популярных форматов ENVI BIL/BIP/BSQ, Geotiff, NetCDF, HDF5
Графические форматы: совместимость с распространёнными форматами изображений (PNG, JPG, TIFF, BMP)
Внутренний формат HSFP: специализированный формат для быстрой и эффективной обработки больших объемов гиперспектральных данных

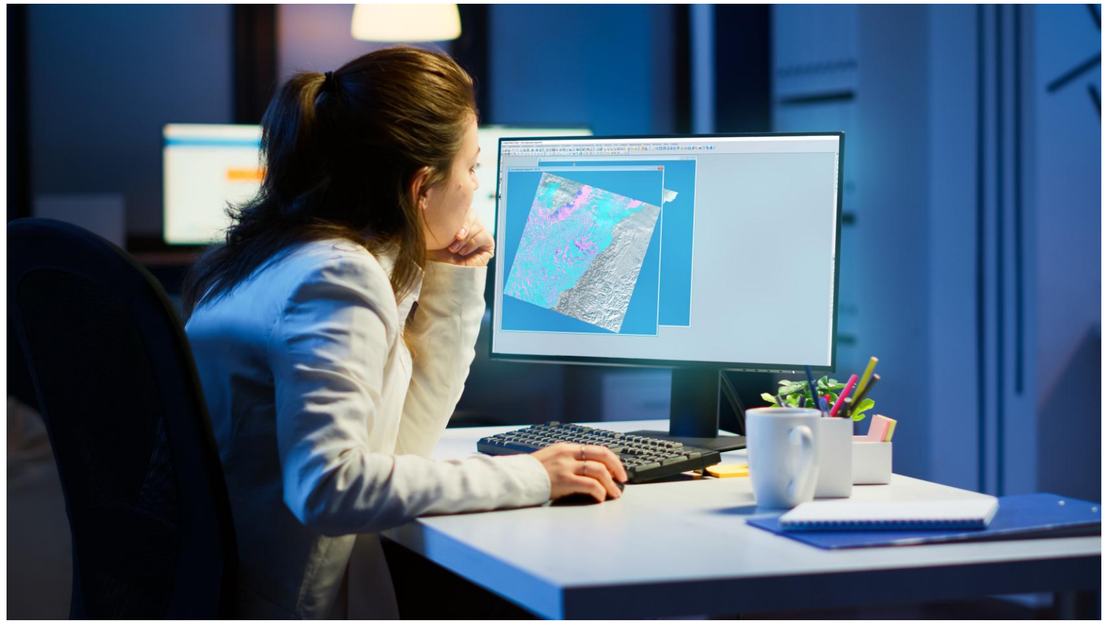
Типы данных
Цифровые форматы: поддержка целочисленных форматов (8-, 16-, 32-разрядные данные)
Числа с плавающей точкой: поддержка форматов Float32 и Float64
Многоспектральные наборы: возможность обработки данных с множественными спектральными слоями

Распределённые вычисления: поддержка параллельных вычислений для ускорения обработки данных
GPU-ускорение: повышение производительности за счет использования графических процессоров

Совместимость
Комплекс успешно функционирует на большинстве устройств и платформ:
Операционные системы: Windows 10 и выше, Debian-based и Red Hat Enterprise Linux
Рабочие станции и серверы: поддержка мощных компьютеров и серверов с GPU-ускорением

Дополнительные инструменты анализа
Комплекс оснащен дополнительными алгоритмами, разработанными специально для анализа гиперспектральных данных:
Сегментация и кластеризация: автоматическое выделение объектов на изображениях с помощью методов машинного обучения
Спектральный анализ: выявление скрытых особенностей и характеристик поверхностей с помощью глубокого анализа
Анализ временных рядов: отслеживание динамики изменений (рост растений, состояние лесов, воды) с использованием технологий искусственного интеллекта

Обработка изображений
Предварительная подготовка: автоматическое подавление шумов, компенсация атмосферных явлений и калибровка сенсоров
Комбинированные изображения: возможность создавать композиции, совмещая разные спектральные каналы
Радиометрическая коррекция: улучшение яркости и контрастности для ясного отображения деталей
Паншарпенинг: повышение пространственного разрешения за счет комбинации спектральных данных с панхроматическими изображениями
Регулировка яркости и контрастности: инструменты для тонкой настройки изображения
Пространственная ориентация
Координатная привязка: точное определение координат съемки (широта, долгота)
Учет высоты и наклона: автоматический учет высоты и угла наклона камеры
Совместимость с GPS/GNSS: поддержка систем глобального позиционирования для точного позиционирования данных



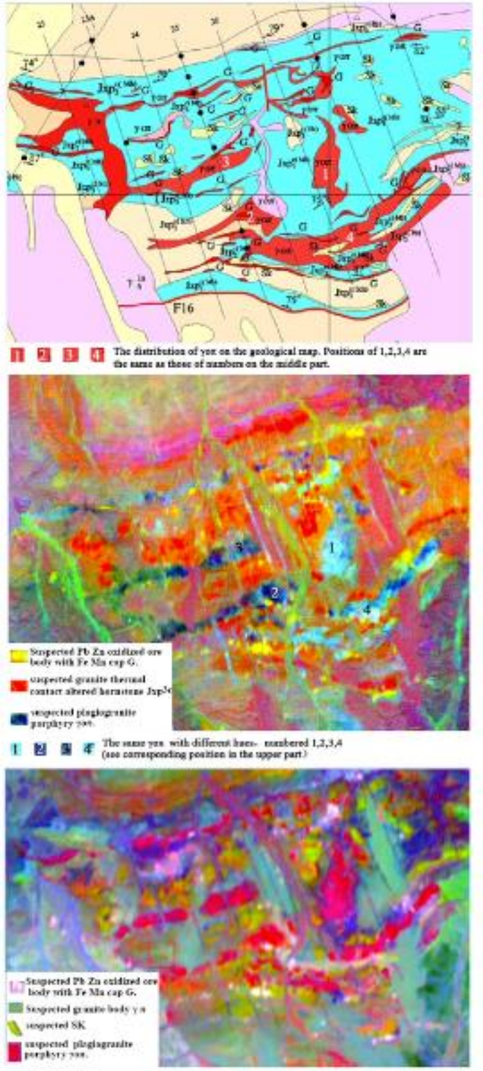
КЕЙС 1 – ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ПО ДАННЫМ ZY1-02D С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (ПЛАТО КОХАТ-ПОТОХАР, ПАКИСТАН)

Основная идея
Оценка возможностей нового космического гиперспектрального сенсора **ZY1-02D** (30 м/пиксель, 166 каналов) для точного геологического картирования в условиях сложного рельефа с валидацией результатов полевыми образцами.

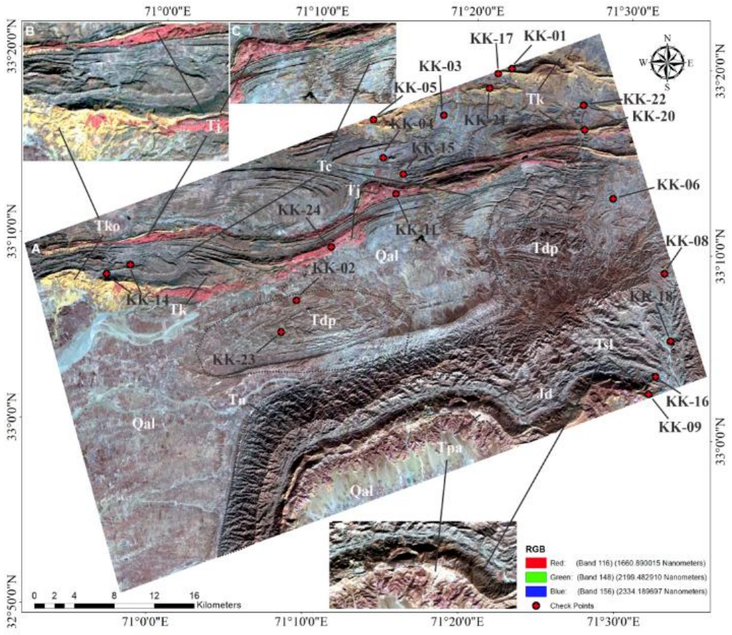
Геологический контекст

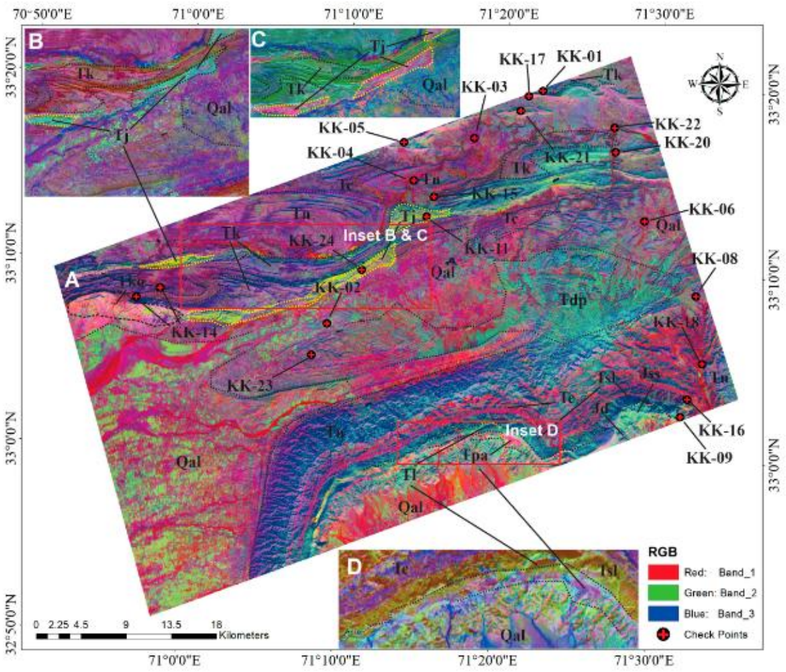
- **Район:** Зона столкновения Индийской и Евразийской плит (Главный пограничный надвиг).
- **Породы:** Известняки, песчаники, глины, конгломераты, гипс, соль (палеоцен – плиоцен).
- **Значение:** Поиск углеводородов, угля, гипса, урана.

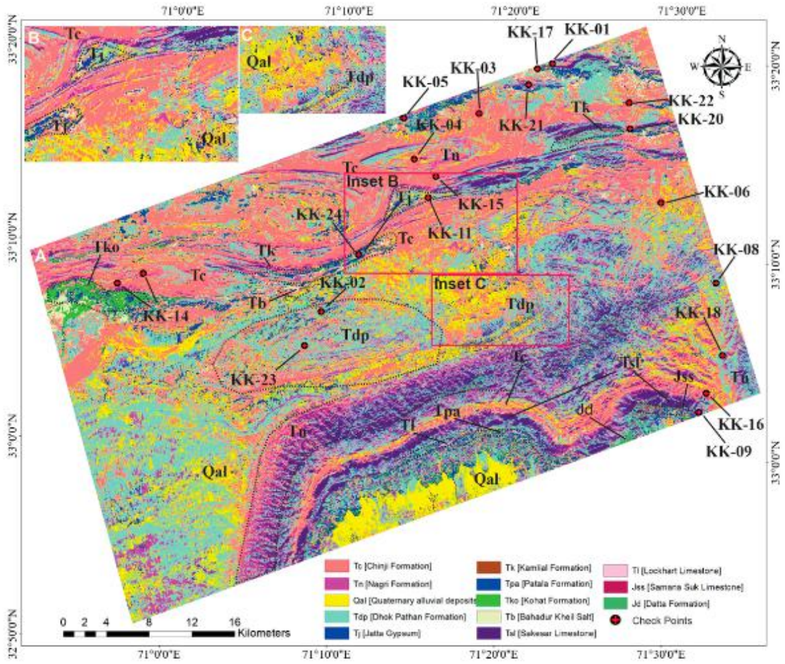
Этап	Метод	Ключевые действия	Результат
Подготовка данных	Атмосферная коррекция	FLAASH + данные MODIS (учет водяного пара)	129 чистых каналов
Традиционный анализ	FCC и PCA	Комбинации каналов (1644, 2199, 2334 нм) и главные компоненты	Визуальное разделение пород: гипс (розовый), карбонаты (желтый)
Машинное обучение	**SVM** (Опорных векторов)	Классификация пикселей на 13 типов пород	**Точность 89.7%** (хорош при малых данных)
Глубокое обучение	**SSTF** (Трансформер)	Учет спектральных + пространственных признаков, аугментация данных	**Точность 92.1%** (лучше в зонах смешения сигнатур)
Валидация	Полевые образцы	Спектральный анализ (лаборатория) + рентгеноструктурный анализ (40 образцов)	Пики поглощения (глины 2200 нм, карбонаты 2335 нм) совпали со спутниковыми данными



КЕЙС 1 – ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ПО ДАННЫМ ZY1-02D С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (ПЛАТО КОХАТ-ПОТОХАР, ПАКИСТАН)







Выводы

ZY1-02D эффективен для регионального геологического картирования, включая небольшие выходы пород.
Метод глубокого обучения (SSTF, 92.1%) превзошел классический SVM (89.7%) в точности, эффективнее решая проблему смешанных пикселей.
Интеграция спутниковых гиперспектральных данных и современных алгоритмов ИИ значительно повышает детальность и объективность геологических карт по сравнению с традиционными методами.

КЕЙС 2 – ХУАНЮШАНЬ, КИТАЙ (ПОЛИМЕТАЛЛЫ)

Объект: Золото-серебро-свинцово-цинковое месторождение (провинция Ганьсу)

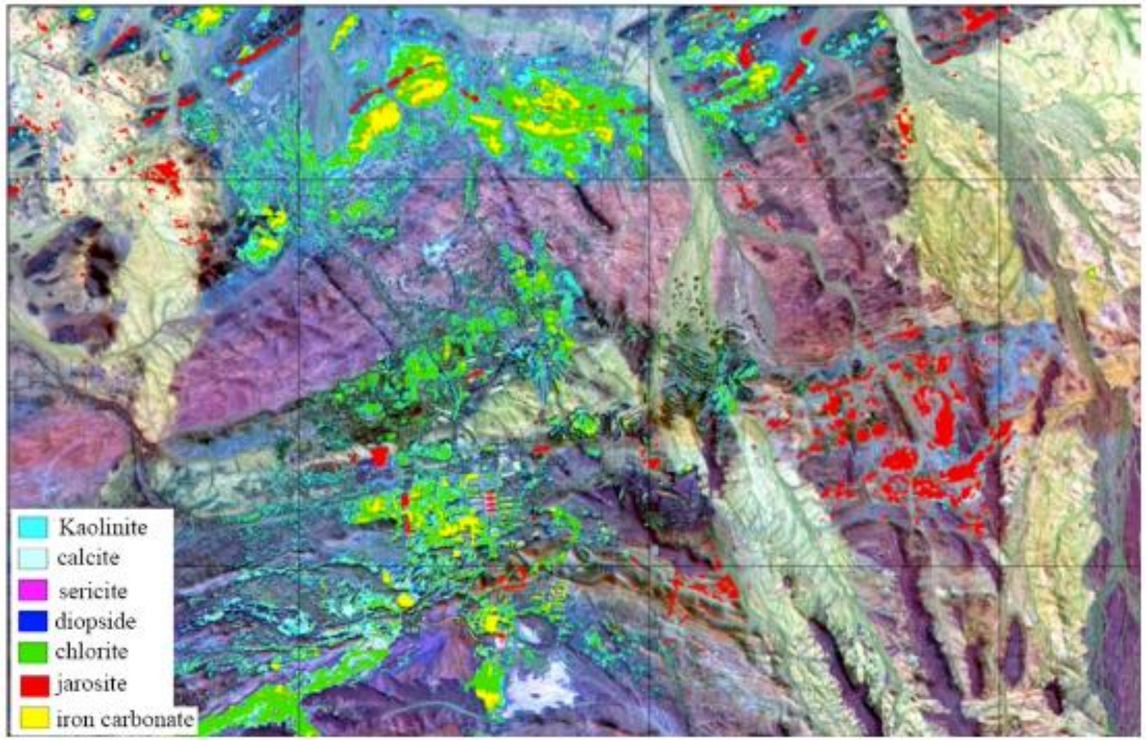
Исходные данные:

- Аэросъемка CASI/SASI (137 каналов)
- Разрешение 1-2.2 м
- Полевые спектры (ASD FieldSpec 4)
- Геологическая карта 1:10 000

Методы: SAM, MNF, MTMF

Результаты (Wan et al., 2021):

- Точность SAM – 65.37% (14 классов пород)
- Распознавание Pb-Zn руд (железо-марганцевая шляпа - gossan) – 81%
- Выявлены несоответствия существующей геологической карте
- Из 30 известных рудных тел подтверждены 26
- 8 из 10 прогнозных участков подтверждены полевыми работами



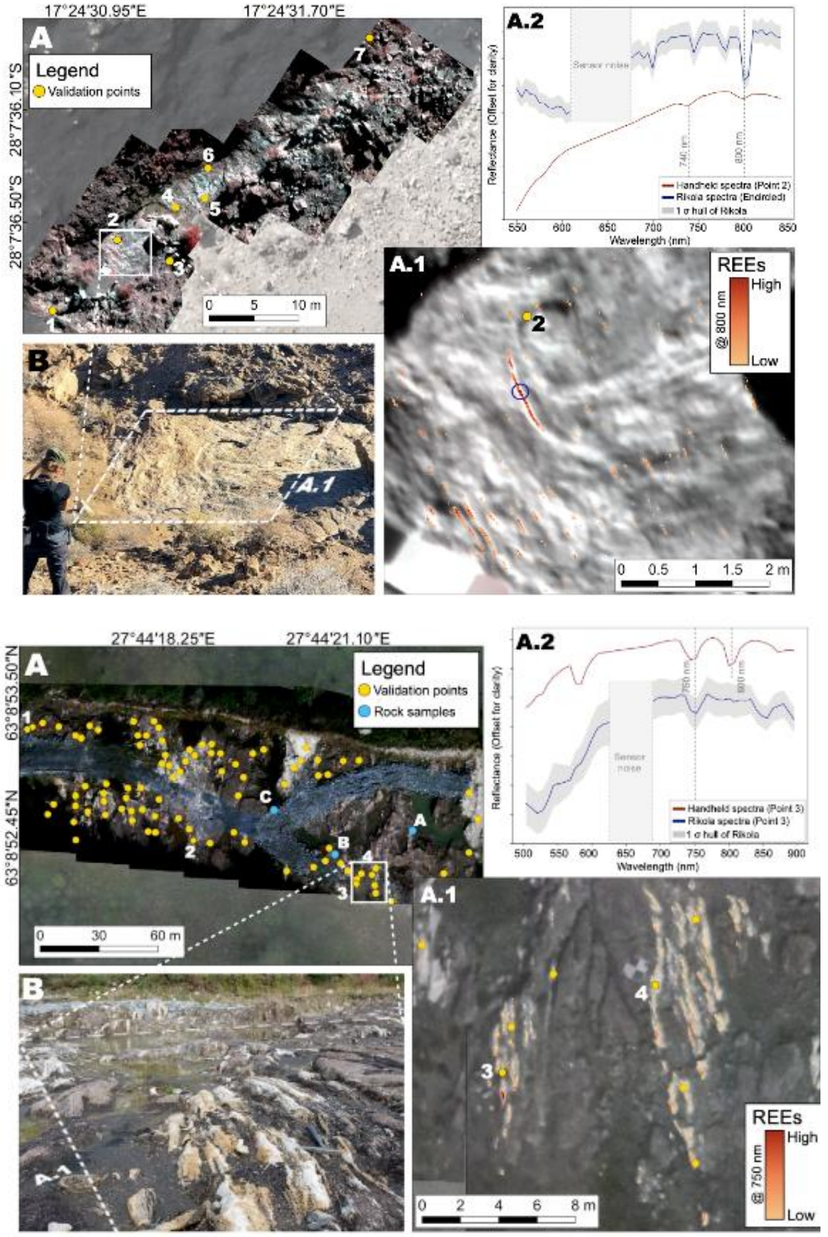
КЕЙС 3 –РУДНИК В СУБАРКТИЧЕСКОЙ ФИНЛЯНДИИ (РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ)

Цель: доказать, что легкий дрон с гиперспектральной камерой может напрямую обнаруживать минералы с РЗЭ на земной поверхности быстро и неинвазивно.

Метод: Съемка с дрона (сенсор Rikola, VNIR-диапазон 500–900 нм) + фотограмметрия для создания 3D-моделей. Поиск вели по характерным пикам поглощения неодима (Nd) — элемента-индикатора РЗЭ.

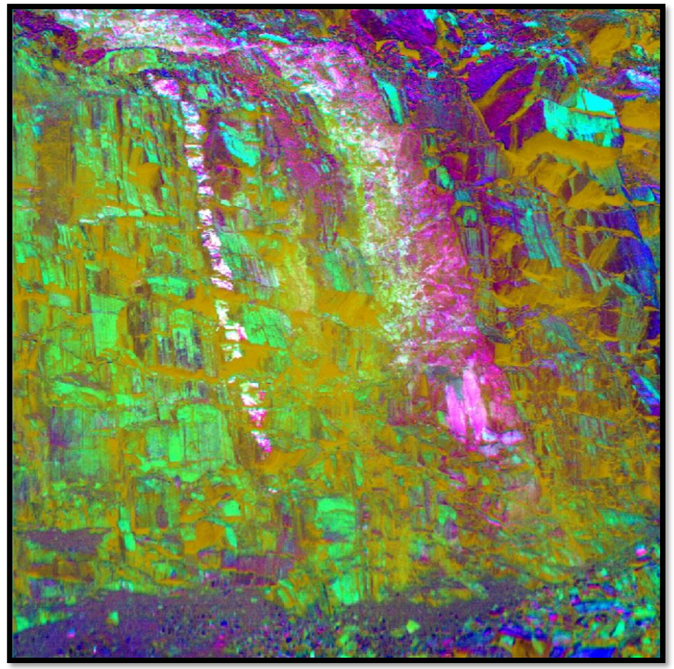
Ключевые результаты
Обнаружение: Впервые составлены детальные карты распределения Nd прямо с дрона. Зоны с РЗЭ четко выделились внутри карбонатитов.
Чувствительность: Метод сработал при содержании Nd от 130–160 ppm (ниже ожидаемого порога в 300 ppm). Максимальное содержание TREO (оксидов РЗЭ) в пробах — 0.57%.
Скорость: Весь цикл «съемка → результат» занимает < 1 дня.
Валидация: Данные дрона совпали с наземными спектрами и лабораторным геохимическим анализом (ICP-MS).

Выводы и практическая значимость
•Технология позволяет геологам в поле моментально определять наиболее перспективные участки для детального изучения и бурения.
•Ограничения: Нужны открытые обнажения (без растительности) и хорошая погода.
•Перспектива: Метод открывает путь для быстрой и безопасной разведки в труднодоступных районах и даже для переоценки старых отвалов (хвостохранилищ) как вторичных источников РЗЭ.



КЕЙС – СТОЙЛЕНСКИЙ ГОК (ЖЕЛЕЗИСТЫЕ КВАРЦИТЫ)





Объект исследования

Железистые кварциты Стойленского месторождения (КМА), входящего в состав Старооскольского рудного узла. Рудовмещающими являются метаморфические породы докембрия (курская серия: коробковская и стойленская свиты), перекрытые осадочным чехлом мощностью 80–180 м. В разрезе преобладают магнетитовые, силикатно-магнетитовые и окисленные разности железистых кварцитов, а также прослои сланцев и дайки диорит-порфиритов, карбонатно-биотитового состава.

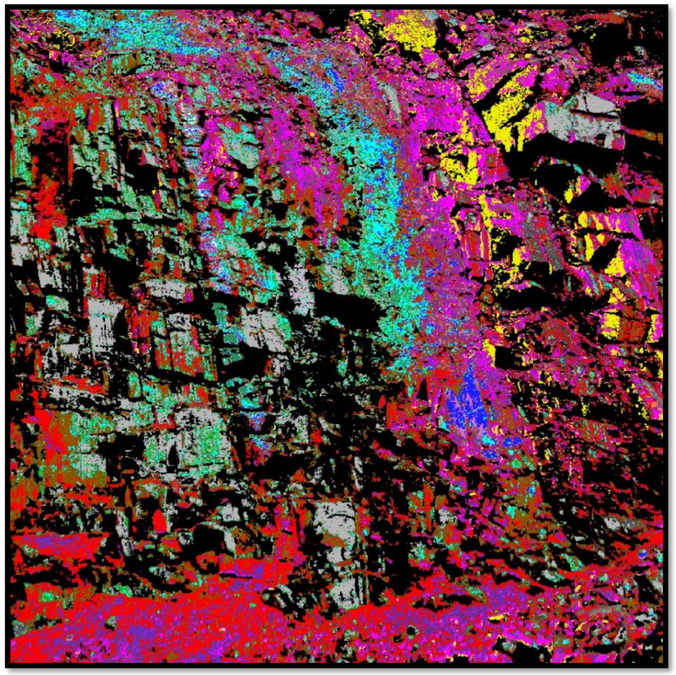
Цель работы

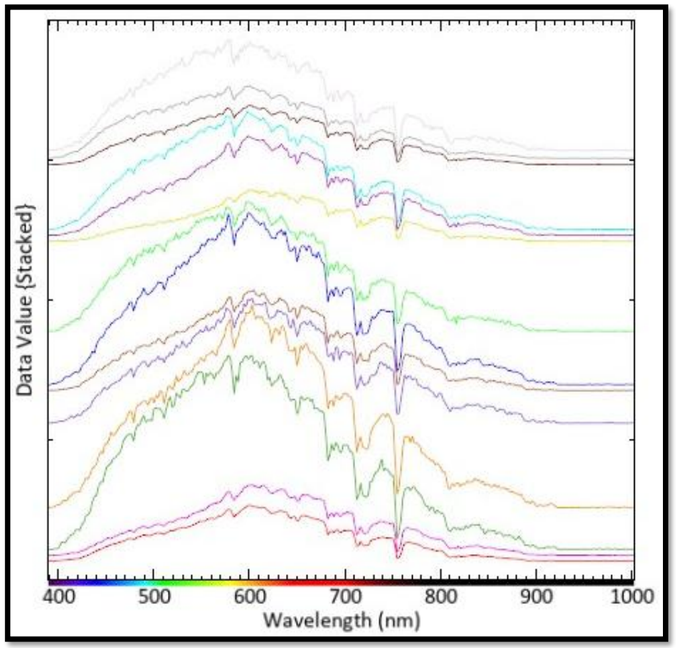
Апробация методов гиперспектральной съемки для оперативного картирования минерального состава железистых кварцитов в условиях карьера и по керновому материалу. Задачи:
•Выявление диагностических спектральных признаков основных минеральных типов руд (магнетит, силикаты, продукты окисления);
•Оценка возможностей классификации гиперспектральных данных для выделения зон с различным вещественным составом;
•Создание методической основы для экспресс-контроля качества рудной массы и бортов карьера.

Методы

Съемка выполнена с использованием гиперспектральной камеры (диапазон VNIR) по керновым образцам и на бортах карьера (зона окисления, свежие железистые кварциты). Обработка данных включала преобразование MNF (Minimum Noise Fraction), классификацию спектрально однородных зон и извлечение уникальных спектральных кривых.

КЕЙС 4 – СТОЙЛЕНСКИЙ ГОК (ЖЕЛЕЗИСТЫЕ КВАРЦИТЫ)





Полученные результаты

•В ходе анализа гиперспектральных изображений керна и бортов карьера извлечено значительное количество уникальных спектральных кривых, отражающих не только различия в минеральном составе (магнетит, силикатно-магнетитовые разности, зоны окисления), но и влияние влажности, освещения, текстуры поверхности.
•Классификация MNF-преобразованных изображений позволила уверенно выделить участки с преобладанием магнетитовых кварцитов, силикатно-магнетитовых разностей, а также зоны окисления, что согласуется с известными физическими свойствами пород (магнитная восприимчивость, удельное электрическое сопротивление).
•Для образцов керна показана возможность извлечения спектральных кривых, напрямую связанных с минеральным составом, что открывает перспективы создания локальной спектральной библиотеки.

Дальнейшие исследования

1.Идентификация извлеченных спектров путем сопоставления с эталонными образцами минералов (спектрорадиометрия, лабораторные измерения гиперспектральной камерой).
2.Калибровка данных по методам компенсации освещения для повышения воспроизводимости результатов при съемке в карьере и на керне.
3.Разработка алгоритмов классификации для оперативного выделения технологических сортов руд (магнетитовые, силикатно-магнетитовые, окисленные) в процессе ведения горных работ.

ОГРАНИЧЕНИЯ И СЛОЖНОСТИ МЕТОДА

Технические ограничения:

- Влияние атмосферы (водяной пар, аэрозоли)
- Необходимость атмосферной коррекции
- Маскирование растительности (NDVI > 0.3-0.4 исключается)
- Снежный и ледовый покров

Геологические сложности:

- Спектральная вариабельность одного типа пород
- Смешение спектров в пределах пикселя
- Малые объекты (дайки, жилы) – требуют более высокого разрешения



ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Сравнение традиционного и современного подходов:

Ключевое преимущество:
Сужение площади поисков с 200 км² до 10-20 км² наиболее перспективных участков до начала наземных работ

Параметр	Традиционная разведка	С применением гиперспектральной съемки
Охват территории	Ограниченный	До 20 000 км² за один пролет
Время на рекогносцировку	Месяцы-годы	Дни-недели
Точность локализации	Зависит от сети наблюдений	Объективная, основанная на спектральных данных
Стоимость этапа	Высокая	Оптимизируется за счет целевого планирования
Риски пропуска объектов	Высокие	Снижаются за счет полного покрытия

КОНТАКТЫ

САЙТ www.gisproxima.ru

E-MAIL info@gisproxima.ru

ТЕЛЕФОН +7 906 644 66 80