

Обзор зарубежных и отечественных разработок за последние пять лет в области применения гиперспектральных дистанционных данных при геологическом картировании, изучении гидротермальных изменений и прогнозе полезных ископаемых

А. А. Кирсанов, И. О. Смирнова

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, 199106, Россия
E-mail: sio_iv@mail.ru

В последние годы интерес к использованию гиперспектральных дистанционных данных при геологических исследованиях увеличивается. Это связано с запуском новых спутниковых гиперспектральных систем, таких как китайские спутники Ziyuan-1 02D, Gaofen-5, итальянский спутник PRISMA (*итал.* PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa), немецкий спутник EnMAP (*англ.* Environmental Mapping and Analysis Program). Большое внимание уделяется применению авиационных гиперспектральных систем, в том числе установленных на беспилотных летательных аппаратах. Статья содержит обзор опубликованных за последние пять лет зарубежных и отечественных работ в области применения гиперспектральных спутниковых и авиационных данных и современных методов их обработки как традиционными способами, так и с созданием новых усовершенствованных алгоритмов машинного обучения при решении задач геологического картирования, изучения гидротермальных изменений пород, поисков месторождений полезных ископаемых (медно-порфировых, золоторудных, полиметаллических руд, месторождений редкоземельных элементов, углеводородов и др.). Продолжают оставаться актуальными вопросы комплексирования данных, полученных различными спутниковыми системами (Landsat-8, ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), WorldView-3, Sentinel-2 и др.), и геолого-геофизических данных (линеamentного анализа, наземных геологических, спектрометрических, геохимических, авиационных магнитометрических и других исследований). Дана характеристика современному состоянию и перспективам развития методов гиперспектрального дистанционного зондирования в геологических исследованиях как в зарубежных странах, так и в России.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, много- и гиперспектральные данные, методы обработки, геологическое картирование, гидротермальные изменения пород, поиски месторождений полезных ископаемых

Одобрена к печати: 12.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-49-67

Введение

Зарубежные работы, посвящённые вопросам применения много- и гиперспектральных космических данных и методов их обработки при геологических исследованиях, опубликованные до 2019 г., проанализированы в предыдущем обзоре авторов (Смирнова и др., 2020). В последние годы осуществлён запуск новых спутниковых гиперспектральных систем, таких как китайские спутники ZY-1 02D (*англ.* Ziyuan-1 02D), Gaofen-5 с усовершенствованным гиперспектральным сенсором AHSI (*англ.* Advanced Hyperspectral Imager), итальянский спутник PRISMA (*итал.* PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa), немецкий EnMAP (*англ.* Environmental Mapping and Analysis Program). Большое внимание уделяется использованию авиационных гиперспектральных систем, таких как гиперспектральный картограф HyMap (*англ.* Hyperspectral Mapper), гиперспектральный спектрометр норвежской фирмы NEO (*норв.* Norsk Elektro Optikk) HySpex (*англ.* Hyperspectral Imaging Spectrometer), авиационный спектрометр видимого и инфракрасного диапазона следующего поколения AVIRIS-NG (*англ.* Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer — Next Generation), авиационный спектрометр

AISA Fenix (*англ.* Airborne Imaging Spectrometer Fenix), гиперспектральная камера компании Telops в длинноволновом инфракрасном диапазоне (*англ.* Long Wave Infrared — LWIR) Telops Hyper-Cam LW, камера Senop Rikola, многие из которых могут быть установлены на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Для геологического картирования, изучения гидро-термальных изменений пород и поисков полезных ископаемых обработка и комплексный анализ многоспектральных, гиперспектральных и геолого-геофизических данных проводится как с использованием традиционных методов, так и с помощью новых усовершенствованных алгоритмов машинного обучения. Цель настоящего обзора — показать возможности новых спутников и авиационных систем, а также новых методов обработки гиперспектральных данных в комплексе с многоспектральными и геолого-геофизическими данными при геологических исследованиях, определить наиболее информативные методы обработки данных и основные тенденции развития гиперспектрального зондирования как в зарубежных странах, так и в России.

Краткая характеристика современных космических и авиационных спектрометрических систем дистанционного зондирования для геологических исследований

Использование новых космических (ZY-1 02D, PRISMA, EnMAP, Gaofen-5) и авиационных (HyMap, HySpex, AVIRIS-NG, AISA Fenix и др.) гиперспектральных систем с высоким спектральным разрешением в видимом и ближнем инфракрасном VNIR (*англ.* visible and near infrared) диапазоне (400–1000 нм), коротковолновом инфракрасном SWIR (*англ.* shortwave infrared) (1000–2500 нм), в меньшей степени в тепловом инфракрасном TIR (*англ.* thermal infrared) (7,7–12,5 мкм) с высоким пространственным разрешением открыло новую эру спутникового дистанционного зондирования для геологических исследований. В то же время продолжает оставаться актуальным использование широко известных космических систем: Landsat-8, ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) на спутнике Terra, Hyperion, WV-3 (*англ.* WorldView-3), Sentinel-2. Гиперспектральные авиационные системы, а также другие многоспектральные камеры, фотокамеры высокого разрешения, аппаратура для магниторазведки, гравиразведки и лазерного сканирования устанавливаются на БПЛА и демонстрируют высокие перспективы для геологических исследований.

Основные характеристики космических и авиационных спектрометрических систем, данные которых анализируются в обзоре, приведены в *таблице*.

Основные характеристики космических и авиационных спектрометрических систем

Сенсор, страна, год запуска	Количество каналов, спектральные диапазоны, нм	Спектральное разрешение, нм	Пространственное разрешение, м
<i>Космические гиперспектральные и многоспектральные системы</i>			
Ziyuan-1 02D, Китай, 2019 г.	166 (395–2021): 76 — VNIR (395–1040), 90 — SWIR (1005–2021)	10 (VNIR), 20 (SWIR)	30
PRISMA, Италия, 2019 г.	237 (400–2505): 66 — VNIR, 171 — SWIR	12	30
EnMAP, Германия, 2021 г.	262 (420–2450): 99 — VNIR, 163 — SWIR	6,5 (VNIR), 10 (SWIR)	30
Gaofen-5 (AHSI), Китай, 2018 г.	330 (400–2500) VNIR, SWIR	5 (VNIR), 10 (SWIR)	30
Hyperion, США, с 2000 по 2017 г.	220 (430–2400) VNIR, SWIR	10	30
Landsat-8, США, 2013 г.	11: 6 — VNIR, 3 — SWIR, 2 — TIR (10 600–12 510)	16–60 (VNIR), 86 (SWIR), 60–100 (TIR)	15–30 30 100

Окончание табл.

Сенсор, страна, год запуска	Количество каналов, спектральные диапазоны, нм	Спектральное разрешение, нм	Пространственное разрешение, м
ASTER, Япония, США, 1999 г.	14: 3 — VNIR (520–860), 6 — SWIR (1600–2430), 5 — TIR (8125–11650)	60–80 (VNIR), 40–100 (SWIR), 350–700 (TIR)	15 30 90
WorldView-3, США, 2014 г.	16: 8 — VNIR (400–1040), 8 — SWIR (1950–2365)	30–180	1–4
Sentinel-2, Европа, 2015 г.	12: 9 — VNIR (433–950), 3 — SWIR (1365–2390)	15, 20, 65 (VNIR), 90, 180 (SWIR)	10, 20, 60
<i>Авиационные гиперспектральные системы</i>			
HyMap, Австралия, 1996 г.	126 (450–2480) VNIR, SWIR	13–17	2,5–5
AVIRIS-NG, США, 2012 г.	425 (370–2500) VNIR, SWIR	5	8,1
NEO HySpex, Норвегия	504 (400–2500) VNIR, SWIR	5	3,26–5,45
AISA Fenix, Финляндия	420 (400–2500) VNIR, SWIR	6	
Senop Rikola, Финляндия	50 (504–900) VNIR	8	
Telops Hyper-Cam LW, Канада	7700–12 000	25–150	От 0,35

Геологическое картирование

Для геологического картирования использование новых гиперспектральных спутниковых данных позволяет получить интересные результаты. Так, в работе китайских исследователей рассматриваются новые методы машинного обучения при обработке данных, полученных китайским спутником ZY-1 02D, для построения новой двухслойной модели классификации литологии с экстремальным градиентным усилением XGBoost (*англ.* Two-layer Extreme Gradient Boosting) на основе оптимизации модели дерева принятия решений с увеличенным градиентом GBDT (*англ.* Gradient Boosting Decision Tree) и улучшенного алгоритма поиска (Lin et al., 2023). Район исследования расположен в горах на стыке провинций Цинхай Тибетского автономного округа и Ганьсу (Внутренняя Монголия, Китай), характеризуется хорошей обнажённостью, наличием только травянистой растительности в нижней части и полным её отсутствием выше 4500 м, что идеально для геологического картирования. Были классифицированы семь типов пород: мрамор, монцонитовый гранит, граносиенит, диорит, габбро, гранит-порфир и гранодиорит. В первый слой модели XGBoost введено 153 спектральных диапазона предварительно обработанных гиперспектральных изображений. На основе структурных характеристик в модели XGBoost определены три индекса важности признаков. Улучшенный алгоритм поиска использовался для извлечения спектральных признаков, которые импортированы во второй слой модели XGBoost. Процесс выбора признаков, объединённый с улучшенным алгоритмом поиска, гарантировал, что оптимальное решение может быть получено на каждом шаге от локальной до глобальной оптимизации. Подмножество признаков с наивысшей точностью классификации обеспечило стабильность и оптимальность модели. Надёжность модели оценивалась на основе четырёх индексов, значения которых составили более 0,8. Результаты показали, что двухслойная модель XGBoost по сравнению с традиционной моделью машинного обучения имеет высокую производительность. Сопоставление результатов классификации гиперспектральных изображений с существующими геологическими картами и результатами полевой проверки показало высокую согласованность, кроме того, в дополнение к известным типам пород, были идентифицированы новые литологические единицы: для области *a* (*рис. 1*, см. с. 52), кроме совпадающих с геологической картой выходов мрамора, монцонитового гранита, гранодиорита и диорита, выделен участок распространения гранит-порфира; для области *b* обломочные породы подразделяются на гранодиорит, монцонитовый гранит, диорит, гранит-порфир, не отражённые

на геологической карте; для области *c* выделены гранодиорит, монцонитовый гранит, гранит-порфир и дополнительно граносиенит.

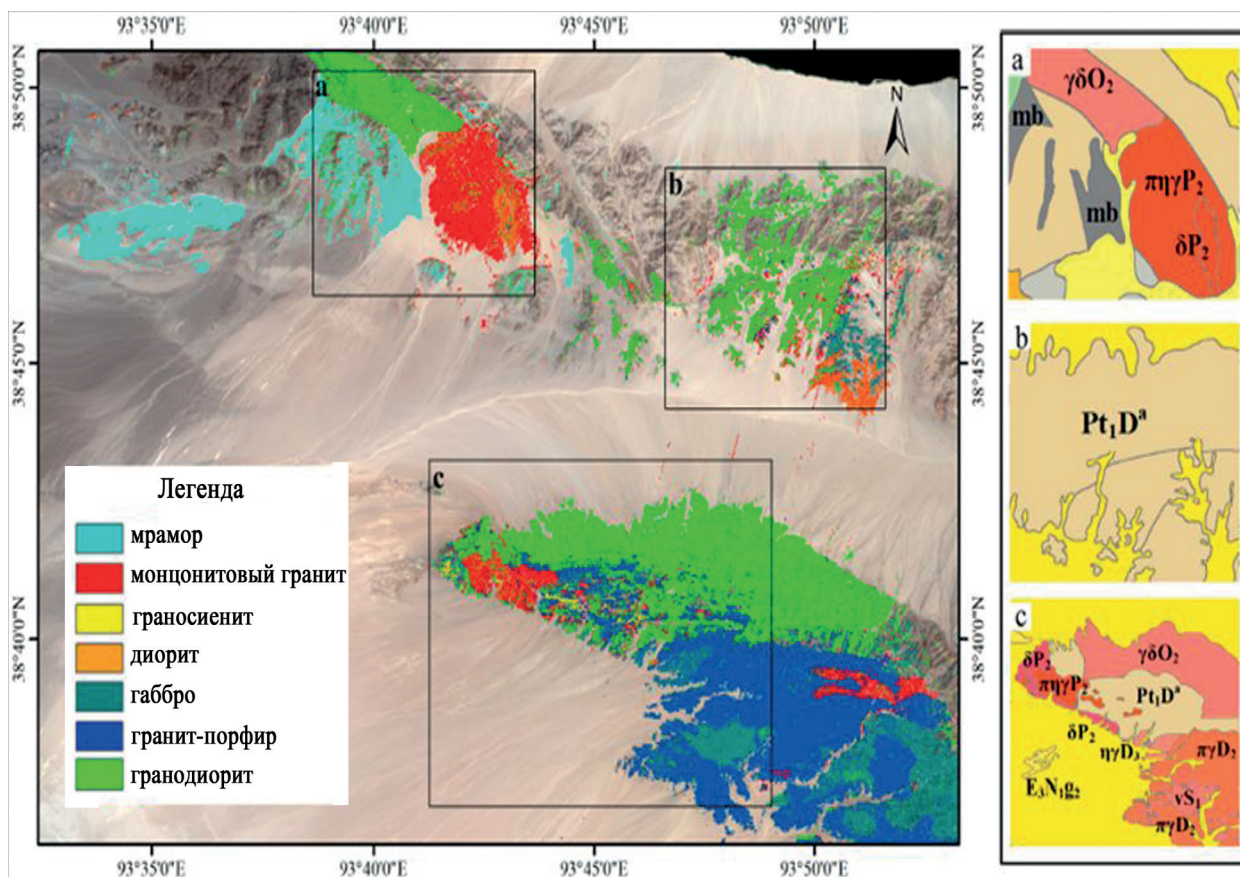


Рис. 1. Цифровая геологическая карта-схема, полученная с помощью двухслойной модели XGBoost. На области *a*, *b*, *c* приведены фрагменты геологической карты (Lin et al., 2023)

Существенное значение для геологического картирования и разведки полезных ископаемых имеет устранение влияния растительности. По данным гиперспектрального датчика ANSI, установленного на китайском спутнике Gaofen-5, проанализирован потенциал высокочастотных компонентов, полученных с помощью дискретного вейвлет-преобразования, для улучшения литологической дискриминации в смешанных спектрах «редкая растительность – горные породы». Проективное покрытие растительности (травы, кустарников, лишайников) составляло от 5 до 60 %. Метод позволил улучшить возможности выделения туфа, гранита, известняка и песчаника. Наиболее восприимчивы к помехам от растительности оказались спектры андезита (Guo, Jiang, 2025).

Комплексирование данных Gaofen-2 в панхроматическом и VNIR диапазонах, многоспектральных Sentinel-2A, ASTER, а также Gaofen-3, оснащённого радиолокатором с синтезированной апертурой высокого разрешения SAR (англ. Synthetic Aperture Radar), и полевого опробования для литологического картирования территории уезда Дуолун, Внутренняя Монголия (Китай), представлено в работе (Lu et al., 2025). В модели использовались 63 признака: спектральные и текстурные признаки оптических изображений, признаки обратного рассеяния, поляризации и текстуры SAR. Для минимизации влияния растительности применён метод фильтрации изображений на основе нормализованного вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index). Проведена классификация методом опорных векторов SVM (англ. Support Vector Machines). Подавление растительности улучшило общую точность модели на 2 %.

На территории гравийного карьера Наундорф в Саксонии (Германия) представлены результаты комплексного анализа данных: VNIR, полученных с БПЛА спектрометром Senop Rikola, гиперспектральных наземных VNIR – SWIR (спектрометр финской фирмы Specim AISA Fenix) и тепловых LWIR (Telops Hyper-Cam LW) (Kirsch et al., 2018). Обработка данных включала: радиометрическую, геометрическую, атмосферную коррекцию, создание мозаик; маскирование растительности с помощью индекса NDVI; спектральное сглаживание на основе преобразования минимальной доли шума; картирование минимальной длины волны для выделения изменений в содержании минералов в различных полосах поглощения (2160–2220 нм для Al–OH, 2230–2295 нм для Fe–OH, 2300–2360 нм для Mg–OH/CO₃ и др.), созданное с использованием инструментария Hyperspectral Python; деление каналов и классификацию методом спектрального угла. На основе проведённого анализа были успешно выделены две основные литологические зоны. Гиперспектральные данные LWIR использовались для различения типов пород, в которых преобладают кварц и плагиоклаз.

Метод автоматической классификации пород фосфатного рудника в Каджати (Бразилия) с использованием методов машинного обучения (опорных векторов, *k*-средних, случайного леса RF (*англ.* Random Forest), дерева принятия решений) предложен для обработки данных видимого диапазона, полученных камерой, установленной на БПЛА (Beretta et al., 2019).

Поиски и разведка полезных ископаемых

Много работ посвящено картированию гидротермально изменённых пород и выявлению минералов-индикаторов гидротермальных изменений пород как поисковых признаков на различные типы полезных ископаемых.

В публикации китайских исследователей рассматриваются методы машинного обучения при обработке гиперспектральных данных, полученных китайским спутником ZY-1 02D на район Цинхай-Гули (Китай), для выявления минералов-индикаторов гидротермальных изменений (Lin et al., 2022). Предварительная обработка включала: устранение диапазонов поглощения водяного пара, радиометрическую калибровку с помощью программы ENVI (*англ.* Environment for Visualizing Images), атмосферную коррекцию с применением модуля FLAASH (*англ.* Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes). При анализе использовались данные наземного спектрометра, полученные для образцов горных пород (мрамора, граносиенита и монцогранита) и минералов (лимонита и хлорита), индицирующих зоны гидротермальных изменений, связанных с *золоторудной минерализацией*. Спектры минералов, измеренные в полевых условиях, имеют большее сходство со спектрами гиперспектрального изображения, чем со спектрами из библиотеки спектральных данных о минералах, поэтому они пересчитывались в соответствии с диапазоном длин волн изображения ZY-1 02D. С изображений спектры выделялись с помощью метода спектрального угла SAM (*англ.* Spectral Angle Mapper) в качестве обучающей выборки. С помощью усовершенствованного метода главных компонент проведено уменьшение размерности данных: количество спектральных каналов для лимонита и хлорита уменьшено до 13 и 17, что снизило сложность расчёта модели. Для извлечения минералов-индикаторов использовались различные методы машинного обучения: опорных векторов, случайного леса, дерева принятия решений с увеличенным градиентом, а также разработанный в 2020 г. новый алгоритм оптимизации обучения SSA (*англ.* Sparrow Search Algorithm), обладающий высокой производительностью и возможностью переключения с глобального уровня поиска на локальный. Алгоритм SSA объединён с двумя методами обучения (SSA-RF и SSA-GBDT) для построения интегрированных моделей. Результаты сопоставления с геологическими данными показали, что эти модели следует считать оптимальными, а минералы-индикаторы располагаются между основными разломами и на пересечении разломов.

Ряд работ посвящён использованию гиперспектральных данных со спутника PRISMA. Применение данных PRISMA для картирования изменений минералов рассматривается в районе Сар-э-чах-э-шур, Бирдженд, Иран (Habashi et al., 2024). На этапе предварительной обработки выполнялись радиометрическая коррекция; исключение каналов, связанных с по-

лосами поглощения водяного пара (913–979, 1078–1185, 1317–1491, 1775–2044 нм); атмосферная коррекция методом среднего относительного отражения IARR (*англ.* Internal Average Relative Reflectance). На следующем этапе выделялись конечные элементы с помощью метода неуправляемой классификации — алгоритма вершинных компонентов VCA (*англ.* Vertex Component Analysis), который основан на наличии спектрально чистых пикселей (содержащих один элемент) и работает с помощью итеративного проецирования данных на направление, ортогональное подпространству, охватываемому уже определёнными конечными элементами. Он определяет конечные элементы как крайние точки этих проекций и продолжает процесс до тех пор, пока все конечные элементы не будут идентифицированы. Извлечённые спектры сравнивались со спектрами из спектральной библиотеки Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey) с помощью метода спектрального угла и метода анализа особенностей спектральной кривой SFF (*англ.* Spectral Feature Fitting), использующими спектральное сходство между неизвестным спектром и эталонными спектрами. В результате были выделены изменённые минералы — рихтерит, авгит, хлорит, ильменит, каолинит-сметтит, мирабилит, мусковит и псиломелан. Окончательная карта распределения изменённых минералов получена с помощью классификации методом согласованной фильтрации и разделения MFU (*англ.* Match Filtering Unmixing). Проведены полевые исследования, рентгеновский дифракционный и геохимический анализ образцов отложений, интерпретация геологических карт. Совместный анализ этих данных позволил определить высокое поверхностное содержание изменённых минералов, выделить группы минералов: глины, амфиболов, оксидов, пироксенов, слюд, сульфатных минералов, связанных с определёнными типами полезных ископаемых, и выявить потенциальные зоны для их обнаружения. Группа глины связана с аргиллитовыми изменениями в андезитах и дацитах, группа слюд — с филлитовыми гидротермальными изменениями, индицирующими распределение *медной и золотой минерализации*, оксидная группа в андезите и даците — с *аномалиями олова*, а пироксеновые минералы ассоциируются с *медной и золотой минерализацией*. Сравнение геологических карт с результатами обработки данных PRISMA, проведённое с использованием уравнения нормализованной оценки, показавшей их совпадение на 85,7 %, подчёркивает потенциал данных PRISMA для картирования минеральных изменений и разведки рудных минералов.

Оценка применения данных PRISMA SWIR в Раджастане (Индия) для картирования гидротермально изменённых и выветренных минералов, таких как *каолинит, тальк и монтмориллонит*, с использованием различных алгоритмов классификации на основе машинного обучения (спектрального угла, опорных векторов, дерева принятия решений, случайного леса, алгоритмов на базе нейронных сетей и др.) дана в работе (Agrawal et al., 2023). Исследование показало, что все классификации демонстрируют сходные результаты, но более точными оказались модели на основе искусственной нейронной сети: стохастический градиентный спуск SGD (*англ.* Stochastic Gradient Descent) и многослойные персептронные классификаторы MLP (*англ.* MultiLayer Perceptron). Эти алгоритмы могут устранять ограничения, связанные с эффектами высокой корреляции между спектрами, когда области поглощения минералов перекрываются друг с другом, например, у каолинита и монтмориллонита, что затрудняет их разделение с помощью традиционных методов.

Способность гиперспектральных данных со спутника PRISMA выявлять промышленные *месторождения редкоземельных элементов (РЗЭ)* с использованием спектральных характеристик поглощения оценивалась на севере Намибии, где имеются массивы карбонатитов (Koraskova-Strnadova et al., 2023). Обнаружено несколько областей поглощения в диапазоне 700–900 нм (при 714, 744, 786 и 817 нм), коррелирующих с карбонатитами, имеющими высокое содержание РЗЭ, что позволило выявить три области карбонатитов с перспективными рудными телами.

Работа (Asadzadeh et al., 2024b) посвящена использованию гиперспектральных спутниковых данных EnMAP для картирования РЗЭ в районе крупнейшего месторождения *бастнезита* Маунтин-Пасс (Калифорния). Руда содержит церий (Ce), лантан (La), неодим (Nd) и другие РЗЭ, находится в интрузиях и дайках докембрийских карбонатитов. Данные EnMAP с включёнными поправками на озон и рельеф без спектральной интерполяции обработаны

с применением версии процессора EnMAP методом полиномиальной подгонки спектральной кривой (использовался полином 4-го порядка). Результаты исследований показали, что Nd является наиболее спектрально активным и легко обнаруживаемым РЗЭ спектроскопическими методами. Идентификация Nd основана на особенностях поглощения при 580, 740, 800, 865 нм, а карбонатов — между 2330 и 2340 нм. Для их идентификации был удалён локальный континуум между 520 и 900 нм для VNIR и между 2230 и 2400 нм для SWIR, отдельные полиномы были подогнаны к спектрам с удалённым континуумом. Коэффициенты подогнанного полинома использовались для получения глубины, площади и ширины диагностических признаков поглощения. Область 800 нм применялась для представления относительного содержания Nd в отображённых пикселях. Относительное содержание карбонатов показано при 2340 нм, а распределение оксидов железа — при 690 и 450 нм. Полученная карта, проверенная с помощью лабораторной спектроскопии и поверхностной геологии, демонстрирует возможность обнаружения минералов, содержащих Nd.

Возможность использования гиперспектральных данных, полученных камерой Senop Rikola, установленной на БПЛА для выявления РЗЭ, рассмотрена на примере двух карбонатитовых комплексов, расположенных в различных климатических условиях: в субарктическом регионе — апатитовый рудник Сиилинярви в Финляндии, в засушливой области — комплекс Маринкас Квеллен в Намибии (Vooyesen et al., 2020). Для этих участков созданы орто- и гиперспектральные мозаики, в полевых условиях измерены спектры пород, содержащих РЗЭ. На основании наиболее чётких особенностей поглощения, выявленных по гиперспектральным данным, проведено картирование РЗЭ методом минимальной длины волны с полиномиальной функцией, определяющим положение длины волны на 800 нм в районе Маринкас Квеллен и на 750 нм в районе Сиилинярви.

Комплексирование гиперспектральных и магнитометрических данных в Финляндии проводилось в рамках финансируемого Европейским союзом проекта MULSEDRO (англ. MULti-SEnsor DRONes), заключающегося в создании многосенсорных систем БПЛА для получения магнитных и гиперспектральных данных. Система тестировалась в 2017–2018 гг. на территории Финляндии (месторождение магнетита и ильменита Отанмяки и апатитовый рудник Сиилинярви) (Heincke et al., 2019). Методика использования БПЛА для геологического картирования и разведки полезных ископаемых рассмотрена на территории апатитового рудника Сиилинярви, представляющего собой *карбонатитовую интрузию, содержащую РЗЭ*, внедрённую в гнейсы фундамента, окружённую гидротермально изменёнными породами и прорезанную дайками долеритов (Jackisch et al., 2020). Использовались два БПЛА для магнитных и многоспектральных измерений (камеры Parrot SA, Parrot Sequoia (Франция), работающие в четырёх диапазонах — 550, 660, 735, 790 нм), охватывающих всю целевую область с высоким пространственным разрешением, и мультикоптер для сбора гиперспектральных данных камерой Senop Rikola для выбранных областей. Выполнены автоматическая геопривязка изображений, геометрическая коррекция, создание мозаик, обработка методом опорных векторов, геохимический, минералогический и спектроскопический анализ. В результате комплексной интерпретации данных создана геологическая карта на район рудника Сиилинярви, позволяющая выделить на базе много- и гиперспектральных данных основные литологические единицы и отличить рудоносные породы от пустых, а по магнитным данным изучить ориентацию и глубину подповерхностных структур.

В работе финских исследователей на месторождении *магнетита-ильменита* Отанмяки также рассматривается технология совместного использования много- и гиперспектральных данных, полученных установленными на БПЛА камерами Parrot Sequoia и Senop Rikola, и магнитных данных на различных высотах полёта (15, 40, 65 м) (Jackisch et al., 2019). Месторождение состоит из интрузий габбро, содержащих рудные тела магнетита-ильменита. Обнажения пород покрыты лишайником и низкой растительностью, которая для много- и гиперспектральной мозаики удалялась с использованием маски NDVI с порогом $>0,3$. Для шести целевых классов применялась неконтролируемая классификация методом k -средних. Для железосодержащих элементов использовались положение полосы поглощения при 900 нм и пики отражательной способности между 750–760 нм. Вычислялся индекс железа-

стных минералов, проводились автоматическое выделение линеаментов, классификация методом спектрального угла, полевая проверка. Местоположение зон железистых минералов и магнитных аномалий хорошо коррелирует с геологической картой, что подтверждает перспективность использования БПЛА для разведки полезных ископаемых.

Работа (Asadzadeh et al., 2024a) посвящена изучению изменений минералов *медно-порфирового месторождения* Шадан (Иран) по данным авиационной гиперспектральной системы НуМар. Гиперспектральные данные представлены как данные об отражательной способности поверхности с атмосферной коррекцией с помощью алгоритма переноса излучения HYCORR (www.hyvista.com), ортотрансформированы и объединены в мозаику без применения цветовой балансировки. Для идентификации и картирования минералов использовалась методика извлечения множества спектральных признаков из каждого пиксельного спектра, включая глубину полосы, пропорциональную относительной распространённости минерала; длину волны минимального отражения, пропорциональную катионному/молекулярному составу; ширину полосы поглощения, пропорциональную порядку/беспорядку кристалла. С применением этой методики выделены и закартированы 13 минералов: белая слюда, смектит, каолинит, железистые минералы, биотит, актинолит, эпидот, хлорит, турмалин и ярозит. Одновременное присутствие минералов актинолита, эпидота и хлорита использовано для разделения пропиловых изменений на три субфации. Присутствие актинолитового амфибола закартировано с использованием характеристик поглощения Mg–ОН при 2320 и 2380 нм и поглощения железа в VNIR. Сдвиг в положениях длин волн амфиболов рассчитан с применением подобранного полинома четвёртого порядка между 2275 и 2358 нм. Диагностическая особенность поглощения при 1550 нм использована для изоляции пикселей, содержащих эпидот. Биотит в зоне калийных изменений закартирован с применением особенности поглощения около 2350 нм, трёхвалентное железо — благодаря поглощению около 900 нм, а двухвалентное — при 950 и 1300 нм. Ярозит идентифицирован на основе особенностей поглощения между 550 и 950 нм. Пространственные проявления гипса и турмалина отображены с помощью диагностического признака на 1750 нм и множественных признаков между 2205 и 2245 нм соответственно. Карбонаты не обнаружены. Редкий растительный покров (зелёный и сухой) замаскирован с применением индекса растительности NDVI. Для оценки точности созданных минеральных карт проведены лабораторные исследования образцов с помощью полевого спектрометра ASD FieldSpec-4 (диапазон 350–2500 нм, спектральное разрешение 3–10 нм). Полученные спектры сравнивались с их аналогами из изображений (в той же геолокации). Для составления карты зон, благоприятных для бурения, карты минералов интегрированы в среду геоинформационных систем, преобразованы в карты нечётких доказательств с использованием больших, малых и гауссовых нечётких функций принадлежности, объединены с магнитометрическими и геохимическими данными (карты аномалий Cu, Au, Cu/Zn и др.) с применением метода нечёткой логики.

Интеграции гиперспектральных и магнитометрических данных, полученных авиационным сканером НуМар, посвящена работа, проведённая в Западной Гренландии для исследования ультрамафитового комплекса с высоким содержанием *железа* (Kuras et al., 2022). Для объединения диагностической информации о железе из гиперспектральных и магнитных данных использовалось отношение характеристик поглощения железа для моделирования псевдомангнитных откликов и сравнения их с измеренными магнитными данными. Разработан модифицированный индекс глубины признаков железа MIFD (*англ.* Modified Iron Feature Depth index), который сравнивался с геохимией образцов горных пород. Глубина оценивалась анализом спектральной кривой и вычислением отношения между интерполированной линией, проведённой между обоими плечами функции поглощения, и заданным центром поглощения. Для извлечения MIFD спектральные характеристики, близкие к 1000 нм (двухвалентное железо) и 650 нм (трёхвалентное железо), устанавливались как центры поглощения. Оценки глубины поглощения MIFD650 и MIFD1000 рассчитаны по всем 23 образцам горных пород ультраосновного комплекса, измеренным спектрометром HySprex, и по снимку НуМар. Результаты показали чёткую связь между признаками спектрального поглощения и магнитным откликом от железосодержащих ультраосновных пород.

В работе по картированию изменённых минералов Юдайского *медно-порфирового месторождения* в районе Калатаг, Восточный Тянь-Шань (Китай), использовались гиперспектральные камеры NEO HySpex, установленные на самолёте (Wang et al., 2022). При сравнении спектральных кривых, полученных по данным HySpex, и спектров из библиотеки Геологической службы США извлечены конечные элементы изменённых минералов (гётит, гематит, ярозит, каолинит, кальцит, эпидот и хлорит). Для их картирования использовался алгоритм случайного леса. Точность классификации составила 73 %.

В работе индийских исследователей использованы гиперспектральные данные авиационного сканера AVIRIS-NG для изучения месторождения *талька* в Джахазпуре (Раджастхан, Индия), приуроченного к доломитам (Kumar et al., 2023). Большинство тальконосных областей характеризуются наличием глинистых минералов (каолинит, мусковит, иллит, диккит), указывающим на филлитовое и аргиллитовое изменения, а также повышенным содержанием железа. Для данных AVIRIS-NG выполнена геометрическая, радиометрическая и атмосферная коррекция. Растительность и водоёмы маскировались с использованием вегетационного индекса NDVI ($>0,3$) и нормализованного разностного водного индекса NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) ($>0,2$). Картирование минералов осуществлялось посредством сравнения спектров изображения и спектров из библиотеки на основе метода наименьших квадратов. Проводилась подгонка спектра изображения и спектра из библиотеки для каждого выделяемого минерала.

Для изучения гидротермальных изменений пород и прогноза полезных ископаемых продолжает оставаться актуальным комплексное использование данных ASTER, Landsat, Sentinel-2 и др., обработанных традиционными методами.

Для картирования *гидротермальных изменений минералов и разведки медно-золотой (Cu–Au) минерализации* в труднодоступном арктическом районе на Земле Инглфилда (Гренландия) использовались данные, полученные с помощью датчика, установленного на спутнике WV-3, в комплексе с данными Landsat-8 и ASTER (Pour et al., 2019). Для извлечения эталонных спектров реализован автоматизированный спектральный подход «песочные часы» ASH (*англ.* Automated Spectral Bourglass). Для создания карт минералов использовался алгоритм линейного спектрального разделения LSU (*англ.* Linear Spectral Unmixing). Методы направленного анализа главных компонент DPCA (*англ.* Directed Principal Components Analysis) и деления каналов применены для картирования оксида/гидроксида железа, минералов Al/Fe–ОН, Mg–Fe–ОН, окремнения (Si–ОН) и минеральных групп SiO₂. Дискриминация литологических единиц и зон в региональном масштабе достигнута с использованием данных Landsat-8. По данным ASTER с помощью алгоритма адаптивной оценки когерентности ACE (*англ.* Adaptive Coherence Estimator) составлена карта распределения оксидов/гидроксидов железа и минеральных групп Al/Fe–ОН, Mg–Fe–ОН, Si–ОН/SiO₂ в поясе медно-золотой минерализации на контакте между осадочными, метаморфическими и метамагматическими породами, ортогнейсом и кварцевым диоритом. По данным WV-3 оксиды и силикаты железа закартированы в зонах гидротермальных изменений и выявлены перспективные зоны для разведки Cu–Au.

Данные спутников Landsat-8, Sentinel-2, ASTER и WV-3 использовались для разведки месторождений *свинца и цинка* в центральной части тектонической зоны Кашмар-Керман Центрально-Иранского террейна (Sekandari et al., 2020). Для обработки данных реализованы методы: деления каналов, расчёта индексов, главных компонент, анализ линеаментов. Для интеграции тематических слоёв применялся метод нечёткой логики. Результаты показали, что значимая информация, связанная с оксидом/гидроксидом железа, гидроксилсодержащими и карбонатными минералами, может быть получена делением каналов (4/2, 6/7 и 11/12) для данных Landsat-8 и Sentinel-2. Детальное распределение минералов Al/Fe–ОН, Mg–Fe–ОН/CO₃ и доломита обнаружено с использованием методов деления каналов ASTER. Тепловые инфракрасные данные, полученные Landsat-8 и ASTER, ценны для картирования кварца, андрадита, гипса, кальцита, доломита, диопсида и альбита. Детальная идентификация оксидов трёхвалентного железа, железо-окрашенных изменений и доломита в перспективных зонах получена с использованием деления каналов WV-3 (5/3, 5/2, 7/4).

Комплексное использование данных ASTER, Landsat-8, Sentinel-2 рассмотрено в районе Аравийского Нубийского щита (Египет), содержащего *месторождения золота* в виде жил, образованных гидротермальными флюидами (Abdelkareem, Al-Arifi, 2021). Карта зон гидротермальных изменений получена объединением минеральных индексов и схемы линеаментов с использованием подхода нечёткой логики и согласуется с наблюдаемыми зонами аргиллитовых изменений вокруг минерализованных жил.

Сотрудниками Томского политехнического университета (Ананьев и др., 2019) для построения модели рудного поля Светлое (Хабаровский край), содержащего *золотосеребряные месторождения*, проведено: дешифрирование материалов многоспектральных космических съёмок низкого (MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)), среднего (Landsat, ASTER) и высокого (Ikonos, WorldView-1, -2, QuickBird) пространственного разрешения с выделением линейных и кольцевых (дуговых) структур; расчёт спектральных индексов и анализ главных компонент изображений Landsat и ASTER; спектральный анализ изображения ASTER. Дан прогноз о перспективности южного и юго-восточного фланга рудного поля Светлое на выявление золотосеребряного оруденения. Для той же территории сотрудницей Хабаровского филиала «Полиметалл УК» проведено картирование метасоматических изменений пород по результатам обработки данных ASTER (анализ главных компонент, расчёт спектральных индексов). Выявлены новые массивы вторичных кварцитов, заверенные полевыми работами (Кирсанова, 2024).

В исследовании сотрудников Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва) рассматривались результаты использования данных Landsat-8 для проведения геолого-минералогического картирования территории Юго-Восточного Забайкалья (Россия) с применением методов: анализа главных компонент, минимальной доли шума и независимого компонентного анализа (Нафигин и др., 2023). Выделены группы оксидов/гидроксидов железа, глинистых минералов, содержащих Al–OH, Fe, Mg–OH и карбонатные минералы. Для построения схемы перспективности на *обнаружение полиметаллов* проведена интеграция тематических слоёв с использованием модели нечёткой логики. В работе сотрудников того же института (Ишмухаметова и др., 2023) изложены результаты обработки и анализа данных WV-2 в пределах Талманской площади (Юго-Восточное Забайкалье) для обнаружения зон изменений горных пород, перспективных на выявление *золотополиметаллического оруденения*. Использован метод деления каналов, по результатам которого создана композиция, отображающая спектральные характеристики минералов группы оксидов трёх- и двухвалентного железа. Её сопоставление с геологическими данными позволило идентифицировать спектральные аномалии как индикаторы наличия околорудных изменений, являющихся поисковым критерием гидротермальных месторождений.

Ряд работ посвящён прогнозированию *золотополиметаллической минерализации* на территории Малоуральской зоны Полярного Урала на основе анализа линеаментов, выделенных по данным Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) ручным и автоматическим способом, и их интеграции на основе метода нечёткой логики. Построены схемы плотности линеаментов, прогнозные схемы распределения зон высокопроницаемых горных пород и выявлены перспективные участки на полиметаллический тип минерализации (Иванова, Нафигин, 2023а, б). Изучение особенностей глубинного строения Тоупугол-Ханмейшорского *золоторудного района* Полярного Урала проводилось на основе анализа данных Landsat-8, включающего расчёт индексов, метод главных компонент, анализ линеаментов и кольцевых структур (Викентьев и др., 2021). Установлено, что перспективные на золото площади приурочены к области сопряжения небольших кольцевых структур и рудоконтролирующих разрывных нарушений и выражены контрастными проявлениями индексов оксида трёхвалентного железа и в меньшей степени — оксида двухвалентного железа. В Малоуральской зоне Полярного Урала при *прогнозных на золото работах* для выделения линеаментов и получения индексных изображений использовался HLS (*англ.* Harmonized Landsat Sentinel-2) — продукт получения совместимых данных поверхностного отражения с помощью виртуального созвездия спутниковых датчиков OLI (*англ.* Operational Land

Imager) Landsat-8 и MSI (*англ.* Multi-Spectral Instrument) Sentinel-2 (Иванова, 2024; Иванова, Бочнева, 2024). Интеграция карт распределения гидротермальных изменений, схем плотности линейных элементов по многоспектральным данным и цифровой модели рельефа ASTER GDEM (*англ.* Global Digital Elevation Model), геологической и геофизической информации, а также анализа поисковых признаков позволила оконтурить новые перспективные площади и выделить дополнительные прогнозно-поисковые критерии золотого оруденения.

В совместной работе сотрудников Научного геоинформационного центра РАН (Москва) и Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (Санкт-Петербург) по результатам дешифрирования материалов космической съёмки «Ресурс-П», «Канопус», ASTER в восточной части Чукотского полуострова выявлены структурные элементы тектоно-вулканогенного генезиса, представленные линейными, дуговыми, кольцевыми, элементами различного ранга, контролирующими *локализацию золотого оруденения* Пепенвеевской рудно-россыпной зоны (Миловский и др., 2023). На основе компьютерной обработки данных ASTER по разработанной в Институте Карпинского технологии в Пепенвеевской зоне выявлены площади развития гидротермально изменённых пород (березитов, вторичных кварцитов, серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов), генетически связанных с оруденением. Применение космической съёмки высокого разрешения позволило наметить золотоперспективные участки, приуроченные к вулcano-купольным структурам.

Технология обработки аэрокосмических много- и гиперспектральных данных для выявления гидротермально-метасоматических пород как индикаторов полезных ископаемых разрабатывается в Институте Карпинского с начала двухтысячных годов и представлена более чем в 25 публикациях на конференциях и конгрессах, проводимых в Красноярске («Цветные металлы и минералы», 2017, 2024 гг.), Якутске («Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России», 2018, 2019, 2021 гг.), Москве (в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) («Повышение эффективности разномасштабных геологических работ при геологическом изучении недр», 2022 г.), в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ) («Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», 2021, 2023, 2024 гг.)), Санкт-Петербурге (в Институте Карпинского) и др., а также в журналах (Кирсанов и др., 2019, 2021, 2022). Технология разрабатывалась на основе программного продукта ENVI с использованием библиотеки спектров минералов и горных пород и включает ряд последовательных технологических операций: создание гиперспектральной дистанционной основы (ГДО) по снимкам ASTER, Hyperion; анализ геологической, геохимической, геофизической информации; выбор наиболее информативных минералов-индикаторов рудных зон и околорудных изменений горных пород; обработка ГДО различными методами, создание схем пространственного распределения минералов-индикаторов; выявление площадей, перспективных на поиски полезных ископаемых, на основе комплексного анализа дистанционных, геолого-геофизических и геохимических данных (Кирсанов и др., 2019). В процессе работ внедрялись новые технологические решения: выделение спектрометрических ореолов по комплексу минералов как поисковых признаков для выявления полезных ископаемых; выделение гидротермально-метасоматических пород по спектрам, полученным в результате спектрометрирования образцов пород, отобранных в пределах рудных полей и месторождений; выделение конкретной ассоциации минералов-индикаторов на определённый тип полезных ископаемых; выявление гидротермально-метасоматических пород по минеральным ассоциациям (Кирсанов и др., 2023, 2024б). Технология апробировалась в рамках ГДП-200 (геологическое доизучение ранее заснятых площадей в масштабе 1:200 000) на 90 площадях в различных регионах России. Например, на Многовершинной площади Нижнеамурского *золотоносного района* специализированная обработка ГДО, созданной по данным ASTER, с использованием спектров девяти минералов-индикаторов (кварца, серицита, эпидота, хлорита, турмалина, пирита, халькопирита, арсенопирита, молибденита) позволила выявить семь спектрометрических аномалий. На Суеткинской площади (Горный Алтай) составлена карта-схема минералов-индикаторов

зон гидротермально-метасоматически изменённых горных пород, перспективных на *золотое оруденение*, с выделением 18 площадей, рекомендуемых для постановки поисковых работ. На этой площади также проведены экспериментальные исследования по использованию авиационного гиперспектрометра «Фрегат» (128 спектральных каналов в диапазоне 0,4–1,0 мкм со спектральным разрешением 3,6 нм) для выявления минералов-индикаторов золоторудных месторождений (Кирсанов и др., 2019). К сожалению, возможности этого гиперспектрометра ограничены, так как основные минералы-индикаторы обладают спектральными особенностями поглощения в диапазоне более 2 мкм. Результаты обработки и анализа ГДО при прогнозно-поисковых работах в Ломамском потенциальном *золоторудном районе* (Республика Саха, Якутия) позволили выявить зоны гидротермально-метасоматических изменений горных пород и определить участки локализации *благороднометалльного оруденения* для перспективных Билибинской, Эхюндинской и других площадей. Сопоставление результатов с наземными геохимическими изысканиями показывает, что спектрометрические ореолы гидротермально-метасоматических изменений совпадают на большинстве участков с повышенными и высокими значениями содержаний элементов первичных геохимических ореолов рассеяния *золота и серебра* (Кирсанов и др., 2021).

В пределах *золоторудного поля* Светлое (Хабаровский край) кроме спектрального анализа ГДО проводился отбор эталонных образцов гидротермально-метасоматических пород и спектрометрирование пород полевым спектрометром для создания библиотеки спектров эталонных пород конкретной территории. Совмещение схемы точек отбора эталонных пород и их вероятностного распределения по результатам спектрального анализа ГДО показало хорошее пространственное совпадение. Для всей исследуемой площади выявлено девять спектрометрических аномалий, анализ которых, совместно с геологическими материалами, позволил определить четыре перспективных участка (Кирсанов и др., 2022). На Гырбыньинской площади (район хребта Черского, Якутия) выделена минеральная ассоциация кварц-турмалин-хлорит, являющаяся определяющей в составе многих *оловоносных рудных тел* и выбранная в качестве основного индикатора данного оруденения. Вероятностные ореолы этой минеральной ассоциации локализуются преимущественно в пределах выходов магматических пород, их экзоконтактовых зон и дайковых полей в обрамлении интрузивов (Кирсанов и др., 2023).

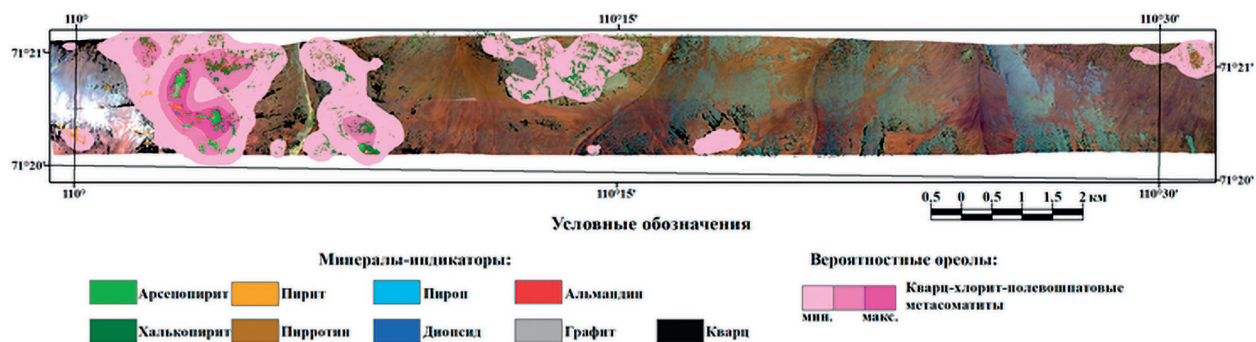


Рис. 2. Попигайская площадь. Схема вероятного распространения минералов-индикаторов и ореолов кварц-хлорит-полевошпатовых метасоматитов по данным гиперспектральной аэросъёмки (Кирсанов и др., 2023)

В настоящее время в Институте Карпинского имеется программно-аппаратный комплекс, включающий: авиационный гиперспектрометр (625 каналов в диапазоне 380–2500 нм с пространственным разрешением 1 м); полевой портативный спектрометрический комплекс PSR+ (1024 канала в диапазоне 350–2500 нм, спектральное разрешение 0,3–0,8 нм). С использованием этого комплекса проведены исследования на *золото* на Кузнецовской и Майской площадях (Ужунжильский *золоторудный узел*, Хакасия) и Попигайской площади (Якутия) (Кирсанов и др., 2023, 2024а, б). Для Кузнецовского и Майского участков выделены ореолы околорудных изменений пород (пропилитизации, березитизации, окварцевания, сульфиди-

зации, каолинизации). Для Попигаийской площади, сложенной гнейсами и сланцами с проявлениями зон катаклаза, милонитизации, бластокатаклаза и бластомилонитизации, в качестве минералов-индикаторов *золотого оруденения* выбраны сульфиды (пирит, арсенопирит, халькопирит, пирротин) и ассоциация нерудных минералов метасоматитов (кварц, хлорит, щелочные полевые шпаты) (рис. 2, см. с. 60).

Геоэкологические исследования на нефтяном месторождении

Рассмотрение использования гиперспектральных данных в геоэкологических исследованиях — предмет отдельной статьи, однако анализ приведённых ниже работ может оказаться полезным и для прогноза месторождений углеводородов.

Потенциал применения гиперспектральных данных, полученных с помощью авиационного датчика AISA Fenix, для картирования наземных разливов нефти оценивался на месторождении Еврона (Израиль) через два с половиной года после загрязнения сырой нефтью (Pelta, Ben-Dor, 2019). Углеводороды имеют специфическое спектральное проявление около 1200, 1700 и 2300 нм и в случаях сильных нефтяных загрязнений чётко фиксируются на аэрокосмических изображениях. Мелкомасштабные утечки, низкий уровень загрязнения, разливы нефти, произошедшие давно, как на месторождении Еврона, могут осложнять использование этих данных. Применение таких методов обработки, как метод стандартизации SNV (*англ.* Standard Normal Variate), выбор оптимальных каналов (выбран диапазон 1500 нм), уменьшение размерности, многомерная калибровка и контролируемое машинное обучение, позволило успешно отличить загрязнённые пиксели от незагрязнённых. Этот подход заключался в обучении модели на основе известного местоположения набора пикселей, помеченных «нефть» и «незагрязнённый», и изучении взаимосвязи между каждым классом и соответствующим ему спектром. Точность классификации составила порядка 0,95. Полученное изображение показало высокую согласованность со снимком, сделанным через несколько дней после катастрофы, когда загрязнение отчётливо наблюдалось. При исследовании возможностей использования разработанной модели для аэрокосмических датчиков установлено, что наилучшие результаты могут быть получены с помощью гиперспектральных датчиков AISA Fenix, AVIRIS, HyMap, EnMap и многоспектрального WV-3, а ASTER, Landsat-8 и Sentinel-2 демонстрируют умеренные результаты. Датчики, измеряющие спектр от 400 до 1000 нм, не подходят для обнаружения загрязнений сырой нефтью (Pelta et al., 2019).

Заключение

Обзор зарубежных и отечественных исследований за последние годы показал, что основные тенденции в применении гиперспектральных данных для геологического картирования, выявления гидротермальных изменений пород и связанных с ними полезных ископаемых следующие:

1) использование данных новых гиперспектральных систем, установленных на спутниках ZY-1 02D, Gaofen-5, PRISMA, EnMAP, авиационных систем HyMap, HySpex, AVIRIS-NG, AISA Fenix, работающих в диапазоне 400–2500 нм, а также установленных на БПЛА (Senop Rikola и др.);

2) внедрение в практику прогнозно-поисковых работ технологий спектрального анализа гиперспектральных аэроснимков, направленное на повышение детальности и точности при выявлении минералов-индикаторов и их ассоциаций за счёт высокого пространственного (1 м) и спектрального (5–10 нм) разрешения;

3) продолжает оставаться актуальным комплексное использование космических систем (Landsat-8, Sentinel-2, ASTER и WorldView-2, -3 и др.) и геолого-геофизических данных (полевого спектрометрирования, радиолокационной съёмки, магниторазведки, минералогических и геохимических данных, анализа линеаментов, кольцевых структур) и их интегрирование на базе геоинформационных систем, в том числе с применением методов нечёткой логики;

4) в области обработки данных большое внимание уделяется радиометрической, атмосферной и геометрической коррекции (последняя особенно важна при съёмке с БПЛА), традиционным методам (главных компонент, расчёту индексов, спектрального угла, опорных векторов и др.), а также внедрению новых усовершенствованных алгоритмов машинного обучения, позволяющих увеличить производительность и надёжность моделей;

5) преимущество использования гиперспектральных данных заключается в возможности получать информацию о распространении минералов и гидротермально-метасоматических пород по всей исследуемой площади (а не точечно, как при анализе образцов, отобранных при полевых работах), в том числе в труднодоступных районах;

6) основные сложности заключаются в том, что в одном пикселе изображения может содержаться информация, относящаяся к нескольким минералам. Поэтому необходимо увеличение пространственного разрешения данных и совершенствование методов субпиксельного анализа;

7) на закрытых территориях применение спектрометрического метода осложняется наличием растительного покрова и рыхлых четвертичных отложений, перекрывающих коренные породы и месторождения. Для устранения влияния растительности разрабатываются специальные методы на основе вегетационных индексов, маскирования пикселей, связанных с растительностью, и вейвлет-преобразования;

8) имеются ограничения в использовании систем, работающих в диапазоне 400–1000 нм, так как большая часть минералов-индикаторов обладает спектральными особенностями поглощения в диапазоне более 2 мкм.

В целом отмечены высокие перспективы использования много- и гиперспектральных данных для геологического картирования, выявления зон гидротермальных изменений пород и поисков месторождений меди, золота, РЗЭ, полиметаллов. Особые перспективы связываются с применением БПЛА, которые благодаря низким расходам на эксплуатацию и простоте обращения могут стать альтернативой исследованиям поверхности Земли из космоса или с борта самолёта.

Литература

1. *Ананьев Ю. С., Житков В. Г., Поцелуев А. А.* Прогнозно-поисковая модель эпитептермальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 84–92. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/270.
2. *Викентьев И. В., Иванова Ю. Н., Нафигин И. О., Бортников Н. С.* Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: первый опыт современного космического зондирования Земли // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S2686739721100170.
3. *Иванова Ю. Н.* Прогнозирование перспективных площадей на золоторудный тип минерализации на основе интеграции геологической, геофизической информации и обработки набора данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2 для территории северного окончания восточного склона Полярного Урала // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 6. С. 17–37. DOI: 10.31857/S0205961424060029.
4. *Иванова Ю. Н., Бочнева А. А.* Прогнозирование перспективных площадей на золоторудный тип минерализации с применением методов математической обработки информации и набора данных КА ДЗЗ Harmonized Landsat Sentinel-2 на территории Полярного Урала // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 2. С. 32–53. DOI: 10.31857/S0205961424020043.
5. *Иванова Ю. Н., Нафигин И. О.* (2023а) Применение спутниковых данных Landsat-8 с целью прогнозирования рудной минерализации для северных территорий на примере центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал) // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 1. С. 24–40. DOI: 10.31857/S0205961423010062.
6. *Иванова Ю. Н., Нафигин И. О.* (2023б) Применение набора данных Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM для прогнозирования золото-полиметаллической минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны, Полярный Урал // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 20–34. DOI: 10.31857/S0205961423050056.

7. *Ишмухаметова В. Т., Нафигин И. О., Устинов С. А. и др.* Выявление зон гидротермально-измененных пород с использованием данных WorldView-2 на участке Талман (Талманская площадь, Юго-Восточное Забайкалье, Россия) // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 58–70. DOI: 10.31857/S0205961423040048.
8. *Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю., Кирсанов Г. А., Смирнова И. О., Павлова В. О.* Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных // Регион. геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90.
9. *Кирсанов А. А., Смирнов М. Ю., Липияйнен К. Л., Кирсанов Г. А.* Новый метод выявления окологорных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия) // Регион. геология и металлогения. 2021. № 86. С. 97–106. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_97-106.
10. *Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю. и др.* Локализация зон гидротермально-метасоматических пород с использованием методов спектрального анализа гиперспектральных космических снимков (на примере золоторудных объектов Ульинского прогиба, Хабаровский край) // Регион. геология и металлогения. 2022. № 89. С. 68–76. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_89_68-76.
11. *Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю., Кирсанов Г. А.* Новые технологические решения с использованием спектрального анализа аэро- и космических гиперспектральных данных // Материалы Всероссийского совещания «Состояние и перспективы развития Государственного геологического картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа». СПб., 2023.
12. *Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю., Кирсанов Г. А.* (2024a) Возможности использования аэрогиперспектральных данных для выявления гидротермально-метасоматических пород // Тез. докладов 13-й Международ. научно-практич. конф. «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». М.: ФГБУ «ЦНИГРИ», 2024. С. 167–169.
13. *Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю., Кирсанов Г. А.* (2024b) Новые технологические решения использования гиперспектральных данных для обнаружения гидротермально-метасоматических пород как индикаторов полезных ископаемых // Материалы Всероссийского совещания «Перспективы развития регионального геологического изучения недр территории Российской Федерации с привлечением собственных средств недропользователей: цели, задачи, ожидаемые результаты». СПб., 2024.
14. *Кирсанова А. В.* Мультиспектральное спутниковое картирование метасоматически измененных пород Ульинского прогиба (Охотско-Чукотский вулканический пояс, Хабаровский край) // Материалы 6-й Международ. конф. молодых ученых и специалистов памяти А. П. Карпинского «Геология XXI века — передовые технологии и научно-методическое обеспечение регионального геологического изучения недр Российской Федерации». СПб., 2024. С. 138–148.
15. *Миловский Г. А., Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Апарин А. Д.* Прогнозирование золото-серебряного оруденения в пределах Пепенвеевской рудной зоны Чукотского полуострова на основе космической съемки Ресурс, Канопус и ASTER // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 4. С. 26–41. DOI: 10.31857/S020596142304005X.
16. *Нафигин И. О., Ишмухаметова В. Т., Устинов С. А. и др.* Оценка пригодности территорий для проведения детального геолого-минералогического картирования на основе статистических методов обработки данных дистанционного зондирования КА Landsat-8: на примере Юго-Восточной Забайкалья, Россия // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 2. С. 61–83. DOI: 10.31857/S020596142301008615.
17. *Смирнова И. О., Кирсанов А. А., Камышиникова Н. В.* Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-9-27.
18. *Abdelkareem M., Al-Arifi N.* Synergy of remote sensing data for exploring hydrothermal mineral resources using GIS-based fuzzy logic approach // Remote Sensing. 2021. V. 13. Article 4492. DOI: 10.3390/rs13224492.
19. *Agrawal N., Govil H., Mishra G. et al.* Evaluating the performance of PRISMA shortwave infrared imaging sensor for mapping hydrothermally altered and weathered minerals using the machine learning paradigm // Remote Sensing. 2023. V. 15. Article 3133. DOI: 10.3390/rs15123133.
20. *Asadzadeh S., Chabrilat S., Cudahy T. et al.* (2024a) Alteration mineral mapping of the Shadan porphyry Cu-Au deposit (Iran) using airborne imaging spectroscopic data: Implications for exploration drilling // Economic Geology. 2024. V. 119. No. 1. P. 139–160. DOI: 10.5382/econgeo.5041.

21. *Asadzadeh S., Koellner N., Chabrilat S.* (2024b) Detecting rare earth elements using EnMAP hyperspectral satellite data: a case study from Mountain Pass, California // *Scientific Reports*. 2024. V. 14. Article 20766. DOI: 10.1038/s41598-024-71395-2.
22. *Beretta F., Rodrigues A. L., Peroni R. L., Costa J. F. C. L.* Automated lithological classification using UAV and machine learning on an open cast mine // *Applied Earth Science*. 2019. V. 128. P. 79–88. DOI: 10.1080/25726838.2019.1578031.
23. *Booyens R., Jackisch R., Lorenz S. et al.* Detection of REEs with lightweight UAV-based hyperspectral imaging // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article 17450. DOI: 10.1038/s41598-020-74422-0.
24. *Guo S., Jiang Q.* Improvement of lithological identification under the impact of sparse vegetation cover with 1D discrete wavelet transform for Gaofen-5 hyperspectral data // *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Article 1974. DOI: 10.3390/rs17121974.
25. *Habashi J., Moghadam H. J., Oskouei M. M. et al.* PRISMA hyperspectral remote sensing data for mapping alteration minerals in Sar-e-châh-e-shur region, Birjand, Iran // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Article 1277. DOI: 10.3390/rs16071277.
26. *Heincke B., Jackisch R., Saartenoja A. et al.* Developing multi-sensor drones for geological mapping and mineral exploration: setup and first results from the MULSEDRO project // *Geological Survey of Denmark and Greenland Bull.* 2019. V. 43. Article e2019430302. DOI: 10.34194/GEUSB-201943-03-02.
27. *Jackisch R., Madriz Y., Zimmermann R. et al.* Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Article 2084. DOI: 10.3390/rs11182084.
28. *Jackisch R., Lorenz S., Kirsch M. et al.* Integrated geological and geophysical mapping of a carbonatite-hosting outcrop in Siilinjärvi, Finland, using unmanned aerial systems // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 2998. DOI: 10.3390/rs12182998.
29. *Kirsch M., Lorenz S., Zimmermann R. et al.* Integration of terrestrial and drone-borne hyperspectral and photogrammetric sensing methods for exploration mapping and mining monitoring // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 1366. DOI: 10.3390/rs10091366.
30. *Kopackova-Strnadova V., Giebel R. J., Rappich V., Magna T.* Testing PRISMA capability to detect rare Earth element contents from space // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2023)*. IEEE, 2023. P. 7610–7613. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282839.
31. *Kumar H., Ramakrishnan D., Jain R., Govil H.* Can imaging spectroscopy divulge the process mechanism of mineralization? Inferences from the talc mineralization, Jahazpur, India // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 2394. DOI: 10.3390/rs15092394.
32. *Kuras A., Heincke B. H., Salehi S. et al.* Integration of hyperspectral and magnetic data for geological characterization of the Niaqornarsuit ultramafic complex in West-Greenland // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 4877. DOI: 10.3390/rs14194877.
33. *Lin N., Liu H., Li G. et al.* Extraction of mineralized indicator minerals using ensemble learning model optimized by SSA based on hyperspectral image // *Open Geosciences*. 2022. V. 14. P. 1444–1465. DOI: 10.1515/geo-2022-0436.
34. *Lin N., Fu J., Jiang R. et al.* Lithological classification by hyperspectral images based on a two-layer XGBoost model, combined with a greedy algorithm // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 3764. DOI: 10.3390/rs15153764.
35. *Lu J., Han L., Wang J. et al.* Lithology classification integrating multi-source remote sensing data after vegetation suppression: a case study from Inner Mongolia Autonomous Region, China // *Geocarto Intern.* 2025. V. 40. No. 1. Article 2462225. DOI: 10.1080/10106049.2025.2462225.
36. *Pelta R., Ben-Dor E.* The potential of multi- and hyperspectral air- and spaceborne sensors to detect crude oil hydrocarbon in soils long after a contamination event // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. Article 5151. DOI: 10.3390/app9235151.
37. *Pelta R., Carmon N., Ben-Dor E.* A machine learning approach to detect crude oil contamination in a real scenario using hyperspectral remote sensing // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. V. 82. Article 101901.
38. *Pour A. B., Park T.-Y. S., Park Y. et al.* Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 multispectral satellite imagery for prospecting copper-gold mineralization in the northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Article 2430. DOI: 10.3390/rs11202430.
39. *Sekandari M., Masoumi I., Pour A. B. et al.* Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 1239. DOI: 10.3390/rs12081239.
40. *Wang S., Zhou K., Wang J., Zhao J.* Identifying and mapping alteration minerals using HySpex airborne hyperspectral data and random forest algorithm // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. Article 871529. DOI: 10.3389/feart.2022.871529.

Review of foreign and domestic developments over the past five years in hyperspectral remote sensing data application in geological mapping, studying hydrothermal changes in rocks and forecasting mineral resources

A. A. Kirsanov, I. O. Smirnova

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg 199106, Russia
E-mail: sio_iv@mail.ru

In recent years, interest in the use of hyperspectral remote sensing data in geological research has increased. This is due to the launch of new satellite hyperspectral systems, such as Chinese Ziyuan-1 02D and Gaofen-5 satellites, Italian PRISMA (*ital.* PRecursoro IperSpettrale della Missione Applicativa) satellite, and German ENMAP (Environmental Mapping and Analysis Program). Much attention is paid to the use of airborne hyperspectral systems, including those installed on unmanned aerial vehicles. The article contains an overview of foreign and domestic works published over the past five years in the field of application of hyperspectral satellite and airborne data and modern methods of their processing. The publications consider both traditional methods and processing involving creation of new advanced machine learning algorithms for solving problems of geological mapping, studying hydrothermal alteration of rocks, and prospecting for mineral deposits (porphyry-copper, gold, polymetallic ores, deposits of rare earth elements, hydrocarbons, etc.). The integration of data obtained by various satellite systems (Landsat-8, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), WorldView-3, Sentinel-2, etc.) with geological and geophysical data (lineament analysis, ground-based geological, spectrometric, geochemical, airborne magnetic and other studies) remains a pressing issue. The current state and prospects for the development of hyperspectral remote sensing methods in geological research, both internationally and in Russia, are discussed.

Keywords: remote sensing, multi- and hyperspectral data, processing methods, geological mapping, hydrothermal alteration of rocks, prospecting for mineral deposits

Accepted: 12.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-49-67

References

1. Ananyev Yu. S., Zhitkov V. G., Potseluev A. A., Prognostic and prospecting model of epithermal Au-Ag deposits of acid-sulfate type based on the interpretation of modern satellite images (using the example of the Svetloe ore field, Khabarovsk Krai), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019, V. 330, No. 5, pp. 84–92 (in Russian), DOI: 10.18799/24131830/2019/5/270.
2. Vikentyev I. V., Ivanova J. N., Nafigin I. O., Bortnikov N. S., Structural position and typification of alteration zones, Polar Urals: First experience of modern space sensing of the Earth, *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2021, V. 500, No. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S2686739721100170.
3. Ivanova J. N., Prediction perspective areas for gold mineralization type using the data set of remote sensing satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the territory of the northern end of the eastern slope of the Polar Urals, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 6, pp. 17–37 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424060029.
4. Ivanova J. N., Bochneva A. A., Prediction perspective areas for gold mineralization using mathematical processing of the data set of remote sensing satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the territory of the Polar Urals, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 2, pp. 32–53 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424020043.
5. Ivanova J. N., Nafigin I. O. (2023a), Application of Landsat-8 satellite data to predict ore mineralization for the northern territories on the example of the central part of the Maloural zone (the Polar Urals), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 1, pp. 24–40 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423010062.
6. Ivanova J. N., Nafigin I. O. (2023b), Application of Landsat-8 data set and the digital elevation model SRTM to prediction gold-polymetallic mineralization to the central part of the Malouralskaya zone, the Polar Urals, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 6, pp. 20–34 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423050056.

7. Ishmukhametova V. T., Nafigin I. O., Ustinov S. A. et al., Identification of zones of hydrothermally altered rocks using WorldView-2 data at the Talman site (Talmanskaya area, South-Eastern Transbaikalia, Russia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 5, pp. 58–70 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423040048.
8. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A., Smirnova I. O., Pavlova V. O., Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing, *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, No. 78, pp. 82–90 (in Russian).
9. Kirsanov A. A., Smirnov M. Yu., Lipiyainen K. L., Kirsanov G. A., New method of identification of hydrothermally altered rocks based on satellite hyperspectral data: example of the Lomamsky potential gold ore field, Republic of Sakha (Yakutia), *Regional Geology and Metallogeny*, 2021, No. 86, pp. 97–106 (in Russian), DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_97-106.
10. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu. et al., Localization of zones of hydrothermal-metasomatic rocks using methods of spectral analysis of hyperspectral satellite images: Case study of gold targets in the Ulinsky Trough, Khabarovsk Territory, *Regional Geology and Metallogeny*, 2022, No. 89, pp. 68–76 (in Russian), DOI: 10.52349/0869-7892_2022_89_68-76.
11. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A., New technological solutions using spectral analysis of airborne and space hyperspectral data, *Materialy Vserossiiskogo soveshchaniya "Sostoyanie i perspektivy razvitiya Gosudarstvennogo geologicheskogo kartografirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii i ee kontinental'nogo shel'fa"* (Proc. All-Russia Conf. "Status and Prospects for the Development of State Geological Mapping of the Territory of the Russian Federation and its Continental Shelf"), Saint Petersburg, 2023 (in Russian).
12. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. (2024a), Possibilities of using airhyperspectral data to identify hydrothermal-metasomatic rocks, *Tezisy dokladov 13-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdeniialmazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov"* (Abstract of the 13th Intern. Scientific and Practical Conf. "Scientific and Methodological Foundations of Forecasting, Prospecting, and Evaluation of Deposits of Diamonds, Precious and Non-Ferrous Metals"), Moscow: FGBU "TsNIGRI", 2024, pp. 167–169 (in Russian).
13. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. (2024b), New technological solutions for using hyperspectral data to detect hydrothermal-metasomatic rocks as indicators of minerals, *Materialy Vserossiiskogo soveshchaniya "Perspektivy razvitiya regional'nogo geologicheskogo izucheniya nedr territorii Rossiiskoi Federatsii s privilecheniem sobstvennykh sredstv nedropol'zovatelei: tseli, zadachi, ozhidaemye rezul'taty"* (Proc. All-Russia Conf. "Prospects for the Development of Regional Geological Study of bowels of the Territory of the Russian Federation with the Attraction of Own Funds of bowels Users: Goals, Objectives, Expected Results"), Saint Petersburg, 2024 (in Russian).
14. Kirsanova A. V., Multispectral satellite mapping of metasomatically altered rocks of the Ulya trough (Okhotsk-Chukotka volcanic belt, Khabarovsk Krai), *Materialy 6-i Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov pamyati A. P. Karpinskogo "Geologiya XXI veka — peredovye tekhnologii i nauchno-metodicheskoe obespechenie regional'nogo geologicheskogo izucheniya nedr Rossiiskoi Federatsii"* (Proc. 6th Intern. Conf. of Young Scientists and Specialists in Memory of A. P. Karpinsky "Geology of the XXI Century — Advanced Technologies and Scientific-methodological Support of Regional Geological Study of the Bowels of Russian Federation"), Saint Petersburg, 2024 (in Russian).
15. Milovsky G. A., Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Aparin A. D., Forecasting of gold-silver mineralization within the Pepenveem ore zone of the Chukchi Peninsula based on space surveys of Resource, Canopus and ASTER, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 4, pp. 26–41 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142304005X.
16. Nafigin I. O., Ishmukhametova V. T., Ustinov S. A. et al., Territoriy suitability assessment for conducting detailed geological and mineralogical mapping based on statistical methods of remote sensing data processing Landsat-8: A case study in south-eastern Transbaikalia, Russia, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 2, pp. 61–83 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142301008615.
17. Smirnova I. O., Kirsanov A. A., Kamyshnikova N. V., A review of the past 5 years of international advances in multi- and hyperspectral satellite data application and processing techniques in geological research, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-9-27.
18. Abdelkareem M., Al-Arifi N., Synergy of remote sensing data for exploring hydrothermal mineral resources using GIS-based fuzzy logic approach, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Article 4492, DOI: 10.3390/rs13224492.
19. Agrawal N., Govil H., Mishra G. et al., Evaluating the performance of PRISMA shortwave infrared imaging sensor for mapping hydrothermally altered and weathered minerals using the machine learning paradigm, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Article 3133, DOI: 10.3390/rs15123133.
20. Asadzadeh S., Chabrilat S., Cudahy T. et al. (2024a), Alteration mineral mapping of the Shadan porphyry Cu-Au deposit (Iran) using airborne imaging spectroscopic data: Implications for exploration drilling, *Economic Geology*, 2024, V. 119, No. 1, pp. 139–160, DOI: 10.5382/econgeo.5041.

21. Asadzadeh S., Koellner N., Chabrilat S. (2024b), Detecting rare earth elements using EnMAP hyperspectral satellite data: a case study from Mountain Pass, California, *Scientific Reports*, 2024, V. 14, Article 20766, DOI: 10.1038/s41598-024-71395-2.
22. Beretta F., Rodrigues A. L., Peroni R. L., Costa J. F. C. L., Automated lithological classification using UAV and machine learning on an open cast mine, *Applied Earth Science*, 2019, V. 128, pp. 79–88, DOI: 10.1080/25726838.2019.1578031.
23. Booyesen R., Jackisch R., Lorenz S. et al., Detection of REEs with lightweight UAV-based hyperspectral imaging, *Scientific Reports*, 2020, V. 10, Article 17450, DOI: 10.1038/s41598-020-74422-0.
24. Guo S., Jiang Q., Improvement of lithological identification under the impact of sparse vegetation cover with 1D discrete wavelet transform for Gaofen-5 hyperspectral data, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, Article 1974, DOI: 10.3390/rs17121974.
25. Habashi J., Moghadam H. J., Oskouei M. M. et al., PRISMA hyperspectral remote sensing data for mapping alteration minerals in Sar-e-châh-e-shur region, Birjand, Iran, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Article 1277, DOI: 10.3390/rs16071277.
26. Heincke B., Jackisch R., Saartenoja A. et al., Developing multi-sensor drones for geological mapping and mineral exploration: setup and first results from the MULSEDRO project, *Geological Survey of Denmark and Greenland Bull.*, 2019, V. 43, Article e2019430302, DOI: 10.34194/GEUSB-201943-03-02.
27. Jackisch R., Madriz Y., Zimmermann R. et al., Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, Article 2084, DOI: 10.3390/rs11182084.
28. Jackisch R., Lorenz S., Kirsch M. et al., Integrated geological and geophysical mapping of a carbonate-hosting outcrop in Siilinjärvi, Finland, using unmanned aerial systems, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 2998, DOI: 10.3390/rs12182998.
29. Kirsch M., Lorenz S., Zimmermann R. et al., Integration of terrestrial and drone-borne hyperspectral and photogrammetric sensing methods for exploration mapping and mining monitoring, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Article 1366, DOI: 10.3390/rs10091366.
30. Kopackova-Strnadova V., Giebel R. J., Rapprich V., Magna T., Testing PRISMA capability to detect rare Earth element contents from space, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2023)*, IEEE, 2023, P. 7610–7613, DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282839.
31. Kumar H., Ramakrishnan D., Jain R., Govil H., Can imaging spectroscopy divulge the process mechanism of mineralization? Inferences from the talc mineralization, Jahazpur, India, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Article 2394, DOI: 10.3390/rs15092394.
32. Kuras A., Heincke B. H., Salehi S. et al., Integration of hyperspectral and magnetic data for geological characterization of the Niaqornarsuit ultramafic complex in West-Greenland, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Article 4877, DOI: 10.3390/rs14194877.
33. Lin N., Liu H., Li G. et al., Extraction of mineralized indicator minerals using ensemble learning model optimized by SSA based on hyperspectral image, *Open Geosciences*, 2022, V. 14, pp. 1444–1465, DOI: 10.1515/geo-2022-0436.
34. Lin N., Fu J., Jiang R. et al., Lithological classification by hyperspectral images based on a two-layer XGBoost model, combined with a greedy algorithm, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Article 3764, DOI: 10.3390/rs15153764.
35. Lu J., Han L., Wang J. et al., Lithology classification integrating multi-source remote sensing data after vegetation suppression: a case study from Inner Mongolia Autonomous Region, China, *Geocarto Intern.*, 2025, V. 40, No. 1, Article 2462225, DOI: 10.1080/10106049.2025.2462225.
36. Pelta R., Ben-Dor E., The potential of multi- and hyperspectral air- and spaceborne sensors to detect crude oil hydrocarbon in soils long after a contamination event, *Applied Sciences*, 2019, V. 9, Article 5151, DOI: 10.3390/app9235151.
37. Pelta R., Carmon N., Ben-Dor E., A machine learning approach to detect crude oil contamination in a real scenario using hyperspectral remote sensing, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, V. 82, Article 101901.
38. Pour A. B., Park T.-Y. S., Park Y. et al., Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 multispectral satellite imagery for prospecting copper-gold mineralization in the northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, Article 2430, DOI: 10.3390/rs11202430.
39. Sekandari M., Masoumi I., Pour A. B. et al., Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT), *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 1239, DOI: 10.3390/rs12081239.
40. Wang S., Zhou K., Wang J., Zhao J., Identifying and mapping alteration minerals using HySpex airborne hyperspectral data and random forest algorithm, *Frontiers in Earth Science*, 2022, V. 10, Article 871529, DOI: 10.3389/feart.2022.871529.