

Присяжнюк Алексей Николаевич,
магистрант, КарТУ им. А. Сагинова

Алексеевич Владимир Романович,
магистрант, КарТУ им. А. Сагинова

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

Аннотация. В статье рассматриваются современные перспективы применения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при геологическом картировании и поисково-оценочных работах. Особое внимание уделено спектральному анализу и мультиспектральным данным, а также возможностям их использования для выявления зон медносодержащих пород. На основе анализа научных публикаций показано, что наиболее эффективным является комплексное применение данных Landsat 8/9, ASTER, Sentinel-2.

Ключевые слова: Дистанционное зондирование Земли, геологическое картирование, спектральный анализ, Landsat, ASTER, Sentinel-2.

В условиях ограниченности минерально-сырьевых ресурсов и необходимости повышения эффективности геологоразведочных работ особое значение приобретают методы дистанционного зондирования Земли. Традиционные полевые методы геологического картирования требуют значительных затрат времени и трудоёмких наземных изысканий. В связи с этим актуальной задачей становится применение современных спутниковых данных для предварительного выявления перспективных участков.

Развитие современных технологий ДЗЗ позволяет получить спектральный анализ земной поверхности. Это расширяет возможности геологического картирования что позволяет получить оценку минералогической интерпретации.

Спектральный анализ заключается в том, что различные минералы, почвы и растительность по-разному отражают спектр. Для геологических задач особенно важны видимый, ближний инфракрасный, коротковолновый инфракрасный и тепловой инфракрасный диапазоны. В этих диапазонах проявляются признаки геологических процессов. Поэтому спектральный анализ позволяет выявлять не сами рудные тела напрямую, а минералы-индикаторы и зоны изменения, которые могут быть связаны с геологическими процессами.

При поисках медносодержащих и других рудных пород важное значение имеют зоны гидротермального изменения. В спутниковых данных такие зоны могут проявляться через повышенные значения индексов оксидов железа, глинистых минералов, гидроксильных минералов, алунит-каолинит-пирофиллитовых ассоциаций, серицит-мусковит-иллитовых ассоциаций и госсанов. На практике обработка обычно включает выбор безоблачных сцен, радиометрическую, геометрическую и атмосферную коррекцию, синтез спектральных каналов, расчёт минеральных индексов, анализ рельефа и последующее сопоставление с геологическими данными.

Способы реализации дистанционных методов зависят от типа используемых сенсоров, а также методов интерпретации спектральных данных.

Данные Landsat 8/9 широко применяются для регионального геологического анализа. Они позволяют строить цветовые композиты, рассчитывать индексы оксидов железа, глинистых минералов, растительности и влажности.

Сенсор ASTER имеет особое значение для геологического картирования, поскольку включает диапазоны VNIR, SWIR и TIR. Коротковолновый инфракрасный диапазон используется для выявления гидротермального изменения. Тепловой инфракрасный диапазон важен для анализа силикатов, кварцсодержащих и карбонатных пород.



Sentinel-2 полезен для геологического картирования за счёт хорошего пространственного разрешения и регулярной повторяемости съёмки. Его данные позволяют уточнять границы открытых пород, анализировать растительность, выделять линеаменты, разломные зоны и цветовые различия поверхности.

Сравнительные характеристики и возможности спутниковых данных для задач в геологии указаны в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица характеристик спутниковых данных

Спутник	Спектральные диапазоны	Пространственное разрешение	Основное применение в геологии
Landsat-8/9	Видимый диапазон, NIR, SWIR-1, SWIR-2, Cirrus, тепловые каналы TIRS	30 м; 15 м панхроматический; 100 м тепловые каналы	Региональный анализ, построение цветowych композитов, индексы оксидов железа, гидроксильных минералов, глинистых изменений
ASTER	VNIR, SWIR, TIR; всего 14 каналов	15 м VNIR; 30 м SWIR; 90 м TIR	Картирование гидротермальных изменений, глинистых минералов, карбонатов, кварцсодержащих пород, оксидов железа, литологических различий
Sentinel-2	Видимый диапазон, red edge, NIR, SWIR	10 м, 20 м, 60 м в зависимости от канала	Уточнение границ открытых пород, железистых зон, линеаментов, литологических различий, маскирование растительности

Практическая эффективность дистанционного зондирования в геологическом картировании подтверждается рядом научных исследовательских работ по всему миру. К примеру, в работе Ogunbassarova et al. рассмотрено применение данных Landsat-8 и ASTER для картирования минералов гидротермального изменения, связанных с Актогайским медно-порфировым месторождением в Восточном Казахстане [1]. Авторы использовали методы обработки данных band ratios, principal component analysis (PCA) и Crosta method для выделения зон калиевого, пропилитового, аргиллитового изменения и зон оксидов железа. Данный пример особенно важен, так как он относится к медно-порфировым типом минерализации.

Совместное использование нескольких спутниковых систем рассмотрено в публикации Khaleghi et al [2]. В данной работе данные Sentinel-2, ASTER и Landsat-8 применялись для картирования гидротермальных изменений и минералов оксидов железа в масштабе рудного участка. Исследование выполнено на территории Zamin-Hosseini в южной части Керманской магматической дуги Ирана, где присутствуют проявления порфировой медной минерализации. Исследования показали, что Sentinel-2 эффективен для выделения железистых зон, а ASTER – для картирования аргиллизированных, филлизитовых и пропилитовых изменений.

В работе Zhang et al. использованы данные ASTER и гиперспектральные данные ZY1-02D для картирования гидротермальных изменений на порфировом медном месторождении Pulang в Юго-Западном Китае [3]. Исследователи применяли методы PCA и MTMF, выделяли серицит, хлорит и эпидот, а также определили шесть новых перспективных зон для дальнейших поисковых работ. Этот пример показывает, что сочетание мультиспектральных и гиперспектральных данных повышает значимость в дальнейшей геологической интерпретации.

Современное развитие методов обработки данных ASTER показано в статье Kalkhoran et al [4]. Авторы применили гибридный алгоритм DWT-2D/MAD для оптимизированного



картирования гидротермальных изменений в порфировых медных системах. Данная работа показывает переход от простых спектральных индексов к более сложным алгоритмам выделения аномалий.

Следующим направлением развития является применение гиперспектральных данных. В отличие от мультиспектральных систем, гиперспектральные сенсоры регистрируют отражение поверхности в большом числе узких спектральных каналов. Это позволяет точнее выделить спектральную кривую поглощения минералов. Для геологических задач интерес представляют продукты отражательной способности поверхности и готовые продукты минералогической интерпретации, которые могут использоваться для уточнения состава выявленных аномалий.

Дальнейшее развитие данного направления связано с комплексным использованием спутниковых данных, спектральных библиотек, цифровых моделей рельефа, ГИС-технологий и результатов полевых наблюдений. Наиболее перспективным является комплексное решение использования данных ДЗЗ: Landsat – для регионального обзора, ASTER – для минералогически ориентированных индексов, Sentinel-2 – для пространственной детализации. Дополнительное внедрение гиперспектральных данных позволит получить более отчетливую картину минералогического состава выделенных аномальных геологических зон. Такой подход может повысить достоверность геологической интерпретации и эффективность поисковых работ

Список литературы:

1. Orynbassarova E., Ahmadi H., Adebijet B., Bekbotayeva A., Abdullayeva T., Beiranvand Pour A., Pyassova A., Serikbayeva E., Talgarbayeva D., Bermukhanova A. Mapping Alteration Minerals Associated with Aktogay Porphyry Copper Mineralization in Eastern Kazakhstan Using Landsat-8 and ASTER Satellite Sensors // Minerals. 2025. Vol. 15, №3. Art. 277. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/3/277>
2. Khaleghi M., Ranjbar H., Abedini A., Calagari A. A. Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2020. Vol. 17, №3. P. 311–328. DOI: 10.13168/AGG.2020.0023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2020_doi/Khaleghi_AGG_2020_0023.pdf
3. Zhang X., Zhao Z., Chen Q., Chai W., Li Z., Zhang G., Yang H., Niu L. Mapping hydrothermal alteration of the Pulang porphyry copper deposit, SW China, using ASTER and ZY1-02D satellite data // Ore Geology Reviews. 2023. Vol. 161. Art. 105605. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105605. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136823003219>
4. Adiri Z., Lhissou R., El Harti A., Jellouli A., Chakouri M. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 117. Art. 103332. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103332. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136819305517>

