# Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях

## И.О. Смирнова, А.А. Кирсанов, Н.В. Камышникова

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

В последние годы в зарубежных странах отмечается повышенный интерес к использованию мульти- и гиперспектральных дистанционных данных при геологических исследованиях. Это обусловлено совершенствованием аппаратуры, установленной на спутниках, подготовкой к запуску новых спутников, а также появлением новых методов обработки данных. Статья содержит обзор опубликованных за последние пять лет зарубежных работ в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки при решении геологических задач. Рассмотрены методы обработки мульти- и гиперспектральных данных, осуществляемой как традиционными методами, так и по новым, усовершенствованным алгоритмам. Проанализированы основные достижения в области геологического картирования, изучения гидротермальных изменений пород, поисков месторождений полезных ископаемых (медно-порфировых, золоторудных, полиметаллических руд, месторождений углеводородов и др.), а также геоэкологического мониторинга с применением данных, полученных различными спутниковыми системами (ASTER, WorldView-3, Sentinel-2, Hyperion и др.). Показаны преимущества использования спектрометрического метода в открытых аридных районах и ограничения его применения на закрытых территориях. Дана характеристика современному состоянию и перспективам развития методов дистанционного зондирования в геологических исследованиях.

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

Одобрена к печати: 23.01.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-9-27

## Введение

Спутниковые мульти- и гиперспектральные системы в геологических исследованиях использовались для картирования структур разного ранга, различных типов пород и поисков месторождений полезных ископаемых (МПИ) в течение многих десятилетий как в России, так и за рубежом. Супер- и гиперспектральные космические радиометры открыли новую эру спутникового дистанционного зондирования для геологических исследований. Среди них: ASTER (Япония, США, 1999) — 14 спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (VNIR: 0,400-1,000 мкм), коротковолновом инфракрасном (SWIR: 1,000–2,400 мкм) и тепловом инфракрасном (TIR: 8,125–11,65 мкм) с пространственным разрешением 15-90 м; Hyperion (США, 2000-2017) — 220 каналов в диапазонах VNIR и SWIR с пространственным разрешением 30 м; WorldView-3 (США, 2014) — 16 спектральных каналов в диапазонах VNIR и SWIR (1-4 м); Sentinel-2 (Европейское космическое агентство, англ. European Space Agency (ESA), 2015, 2017, программа Copernicus) — 13 спектральных каналов в диапазонах VNIR и SWIR (10–60 м), с высоким спектральным разрешением в красной зоне спектра (15 нм); PRISMA (Италия, 2019) с пространственным разрешением 30 м в диапазоне длин волн 0,400–2,505 мкм (66 каналов — VNIR, 171 канал — SWIR); HISUI (Япония, 2019) с пространственным разрешением 30 м в диапазоне 0,400-2,500 мкм (57 каналов — VNIR, 128 каналов — SWIR). В ближайшие годы готовятся к запуску гиперспектральные системы:

EnMAP (Германия) с пространственным разрешением 30 м (99 каналов — VNIR, 163 канала — SWIR); HyspIRI (США) — 30 м (214 каналов — VNIR, SWIR, 8 каналов — TIR); SHALOM (Израиль, Италия) — 10 м (275 каналов — VNIR, SWIR); НурХІМ (Франция) — 10 м (210 каналов — VNIR, SWIR). Хотя в России в последние годы наметилось снижение числа публикаций, посвящённых геологическому картированию и поискам полезных ископаемых, в зарубежных странах отмечается повышенный интерес к использованию мультии гиперспектральных данных в геологических исследованиях, о чём свидетельствуют материалы международных симпозиумов IGARSS, ISPRS, XXXV Международного геологического конгресса, многочисленные публикации последних лет, в том числе работы: «20-летний опыт использования данных системы ASTER при литологическом картировании и поисках полезных ископаемых» (Abrams, Yamaguchi, 2019); «Опыт применения гиперспектральных данных в связи с запуском Sentinel-2» (Transon et al., 2018); обзор по геологическим проектам с применением гиперспектральных данных, проводимым австралийской компанией CSIRO (Cudahy, 2016); обзор по использованию данных ASTER для разведки полезных ископаемых и картирования пород в султанате Оман (Rajendrana, Nasirb, 2019). Геологическому дистанционному зондированию посвящены также специальные выпуски в журналах: Ore Geology Reviews (2019, V. 108); International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (2018, V. 64); Geosciences (2016, V. 6). В этих публикациях большое внимание уделено новым космическим гиперспектральным миссиям, вопросам калибровки, методам предварительной и тематической обработки гиперспектральных данных, полученных космическими и авиационными системами, а также беспилотными летательными аппаратами, и примерам их использования в геологии. Цель настоящего обзора — показать возможности современных спутников и новых методов обработки мульти- и гиперспектральных спутниковых данных при геологических исследованиях, применяемых за рубежом, но мало используемых в России, определить наиболее информативные методы обработки данных, а также оценить преимущества и недостатки спектрометрического метода и перспективы его развития.

## Методы обработки мульти- и гиперспектральных данных

Методика обработки мульти- и гиперспектральных данных в геологии основывается на том, что многие горные породы и минералы характеризуются специфическими характеристиками отражения в различных спектральных диапазонах. В результате гидротермальных (околорудных) изменений пород и миграции флюидов от залежей углеводородов (УВ) в породах и почвах образуются геохимические (повышенные содержания различных минералов), геоботанические (угнетение растительности, уменьшение количества хлорофилла, появление новых видов) аномалии, которые могут быть выделены по спектрам в диапазонах VNIR и SWIR, а также тепловые аномалии, выделяемые в TIR-диапазонах.

Обзор методов обработки мульти- и гиперспектральных данных, используемых при геологических исследованиях, представлен в работе бразильских исследователей (Asadzadeh, de Souza Filho, 2016a). Авторами рассмотрены как стандартные методы, созданные для мультиспектральных данных: методы деления и других математических операций с различными спектральными каналами, соответствующими зонам поглощения минералов; метод главных компонент (*англ*. Principal Component Analysis — PCA); анализ независимых компонент (*англ*. Independent Component Analysis — ICA) и др., так и специально разработанные алгоритмы, включающие методы, которые предполагают сравнение спектра пикселя с эталонным спектром, полученным из спектральной библиотеки. Среди последних — работающие с «целыми» пикселами изображения: метод анализа особенностей спектральной кривой (*англ*. Spectral Feature Fitting — SFF); алгоритм минимального расстояния или максимального подобия; метод спектральной корреляции (*англ*. Spectral Correlation Measure — SCM); метод спектральной корреляции (*англ*. Spectral Correlation Measure — ED); метод расхождения спектральной информации (*англ*. Spectral Information Divergence — SID), а также методы

субпиксельного анализа, использующиеся для количественного подсчёта доли конкретных материалов в каждом пикселе изображения, в частности алгоритмы линейного спектрального разделения (*англ.* spectral unmixing), фильтрации по спектральному подобию — согласованные фильтрации (*англ.* Matched Filtering — MF и Mixture Tuned Matched Filtering — MTMF) и др. Часто применяется метод опорных векторов (*англ.* Support Vector Machines — SVM). Обсуждаются ограничения в использовании отдельных методов и предлагается применение гибридных версий, например MF/SAM, SID/SAM и др. Программный пакет Tetracorder рассматривается как один из успешных вариантов гибридизации методов. Отмечается необходимость одновременной обработки данных в диапазонах SWIR, VNIR и TIR (VNIR/SWIR — для изучения гидротермальных изменений пород, TIR — для силикатных пород и кварца, а также углеводородов). Для успешной спектральной обработки спутниковые датчики следующего поколения должны быть оснащены соответствующими спектральными полосами для компенсации воздействия окружающей среды и атмосферы.

#### Геологическое картирование

Анализ зарубежных публикаций показывает, что наиболее широко в геологических исследованиях используются данные ASTER.

Для геологического картирования неопротерозойского комплекса Корбиай-Герф (англ. Korbiai-Gerf, Египет) применялись данные ASTER, Landsat-8 и цифровая модель рельефа (англ. Digital Elevation Model — DEM) (Hassan, Sadek, 2017). Обработка данных ASTER с использованием метода главных компонент, а данных Landsat-8 — методом деления каналов позволили различить большинство пород, таких как: гранитоиды, гранодиориты, габбродиориты, гнейсы, серпентиниты, тальк, карбонатные породы. Для дифференциации породообразующих минералов использовались подсчитанные по каналам ASTER индексы: каолинитовый (D<sub>4</sub>/D<sub>5</sub>)·(D<sub>8</sub>/D<sub>6</sub>), кальцитовый (D<sub>6</sub>/D<sub>8</sub>)·(D<sub>9</sub>/D<sub>8</sub>), глинистых минералов (алунита/каолинита/пирофиллита)  $(D_5D_7)/(D_6D_6)$ , серицита/мусковита/иллита  $D_5+D_7/D_6$  и карбоната/хлорита  $D_9 + D_7/D_8$  (здесь и далее D — каналы ASTER), а также цветовые композиции (RGB) изображений индексов. Для классификации пород наборы данных Landsat-8 (SWIR + VNIR + ICA + PCA + DEM) и ASTER (SWIR + VNIR + ICA + PCA + DEM) обрабатывались методами спектрального угла (SAM), расхождения спектральной информации (SID) и опорных векторов (SVM). Последний, по сравнению с другими методами, обеспечил наилучшую точность классификации при использовании комбинации из 9 каналов и 20 производных изображений ASTER (97,72 %).

На территории городского округа Удайпур (англ. Udaipur, Индия) проведена обработка данных ASTER (SWIR) с помощью метода главных компонент, алгоритма вычисления минимальной доли шума (англ. Minimum Noise Fraction — MNF) и независимого компонентного анализа (ICA) для геологического картирования (Китага et al., 2015). Выделены следующие породы: конгломераты, граниты, гнейсы, филлиты, сланцы, пегматиты, кварциты, мрамора, вулканические. Наилучшие результаты получены по композиции, составленной из изображений ICA, которые хорошо согласуются с опубликованной геологической картой и данными полевых исследований.

Для геологического картирования в Антарктиде при обработке данных Landsat-8 и ASTER были применены методы анализа главных компонент и согласованной фильтрации (Земля Грэм, *анел*. Graham) (Pour et al., 2019), а также алгоритмы независимого компонентного анализа, минимизации ограниченной энергии (*анел*. Constrained Energy Minimization — CEM) (Северная Земля Виктории, *анел*. Northern Victoria Land) (Pour et al., 2018а). Результаты исследований демонстрируют способность различать изменённые минералы на пиксельном и субпиксельном уровнях на слабообнажённых территориях, что имеет важное значение для геологического картирования и разведки полезных ископаемых в труднодоступных районах.

Широкое применение в геологии находят данные, полученные тепловыми инфракрасными датчиками, в частности ASTER TIR. Представлен обзор истории исследований, методология спектрального измерения и сравнение лабораторных и полевых спектров со спектрами, измеряемыми дистанционно (Ninomiya, Fu, 2019). Рассмотрены основные спектральные индексы, разработанные авторами для извлечения информации о минеральном и химическом составе геологических материалов, и примеры их использования на различных территориях. Для регионального геологического картирования на Тибетском плато рассчитаны минералогические индексы: кварцевый QI =  $(D_{11}D_{11})/(D_{10}D_{12})$ , карбонатный CI =  $D_{13}/D_{14}$  и мафитовый MI =  $(D_{12}(D_{14})^3)/(D_{13})^4$  (Ninomiya, Fu, 2016). Эти индексы показали хорошие результаты при классификации кварцевых и гранитных пород.

По пяти каналам ASTER TIR для определения различий в минералах кварца, полевого шпата и основных (мафитовых) пород разработано несколько новых индексов: индекс кварцсодержащих пород QRI =  $(D_{10}/D_{12}) \cdot (D_{13}/D_{12})$ , полевых шпатов FRI =  $(D_{10} + D_{11})/D_{11}$ , мафитсодержащих пород MRI =  $(D_{12}/D_{13}) \cdot (D_{13}/D_{14})$  (Guha, Kumar, 2016). Дифференциация гранита, щелочного гранита и гранодиоритового гнейса, обогащённого мафитом, осуществлялась по суммарному изображению трёх индексов благодаря различному содержанию кварца, полевого шпата и мафитовых минералов. Сравнение QRI и MRI с соответствующими показателями кварца и мафита, разработанными ранее, показало, что изображение QRI даёт лучшие результаты для определения кварца в щелочных гранитах. Результаты распознавания гранитоидов с использованием предложенных индексов были подтверждены на основе сравнения с геологической картой района исследования.

На территории Раджастхан (англ. Rajasthan, Индия) использовались три тепловых канала ASTER TIR (11, 12, 13) для определения фосфоритов среди вмещающих пород — доломитов — на основе того, что спектр теплового излучения фосфорита отличается сильной характеристикой излучения с минимумами поглощения при 9 и 9,5 мкм, в то время как доломит имеет относительно приглушённые минимумы излучения около 9 мкм (Guha et al., 2019с). При использовании метода относительной глубины спектральной кривой (англ. Relative Band Depth — RBD) было обнаружено, что глубина минимума излучательной способности фосфорита постепенно увеличивается от доломита к фосфориту высокого качества, фосфорит низкого качества имеет промежуточное значение излучательной способности. Выделенные на RBD фосфоритовые пиксели были подтверждены в поле. Отмечено, что выделение фосфоритов по данным TIR более перспективно, чем по VNIR и SWIR, что было показано теми же авторами (Guha et al., 2019а). Выделение фосфоритов проводилось методами адаптивной оценки когерентности (англ. Adaptive Coherence Estimator — ACE), согласованной фильтрации (MF) и методом главных компонент на основе анализа спектрального контраста в областях VNIR и SWIR, связанного с наличием вторичной вибрационной характеристики карбонатных минералов в доломите и отсутствием такой особенности в фосфорите.

Для площади Побэй Синьцзян-Уйгурского района (*англ.* Pobei Xinjiang Uygur region, CУАР, Китай), где широко распространены обнажения коренных пород, дана оценка данных WorldView-3 (WV-3) для геологического картирования в сравнении с данными сенсоров ASTER и Landsat-8 (Ye et al., 2017). Методика исследований включала: предварительную обработку данных; визуальную интерпретацию различных пород; выбор обучающих участков на основе расчёта вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и преобразований (минимальная доля шума (MNF) и индекс чистоты пикселя (*англ.* Pixel Purity Index — PPI)); геологическое картирование с помощью классификации методом опорных векторов (SVM); оценку точности классификации. Результаты показали, что точность классификации по данным WV-3 составила 87 % — выше, чем по данным ASTER и Landsat-8.

Потенциал данных Sentinel-2 для геологического картирования продемонстрирован на примере вулканического поля Кабо-де-Гата (*ucn*. Cabo de Gata) в Альмерии (Испания) (Van der Meer et al., 2014). По каналам Sentinel-2 (обозначены буквой S) предложены индексы, адаптированные к каналам ASTER (D): Fe<sup>3+</sup> — S<sub>4</sub>/S<sub>3</sub> (D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>); Fe<sup>2+</sup> — S<sub>12</sub>/S<sub>8</sub> + S<sub>3</sub>/S<sub>4</sub> (D<sub>5</sub>/D<sub>3</sub> + D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub>); латерита — S<sub>11</sub>/S<sub>12</sub> (D<sub>4</sub>/D<sub>5</sub>); железистых силикатов (биотита, хлорита, амфибола) — S<sub>12</sub>/S<sub>11</sub> (D<sub>5</sub>/D<sub>4</sub>), окисей железа — S<sub>11</sub>/S<sub>8</sub> (D<sub>4</sub>/D<sub>3</sub>), NDVI — (S<sub>8</sub> – S<sub>4</sub>)/(S<sub>8</sub> + S<sub>4</sub>) ((D<sub>3</sub> – D<sub>2</sub>)/(D<sub>3</sub> + D<sub>2</sub>)).

Данные Sentinel-2A и ASTER использованы для геологического картирования в Бейшанском офиолитовом поясе (*англ*. Bieshan, Внутренняя Монголия, Китай) (Ge et al., 2018). Были применены несколько алгоритмов обработки изображений, в том числе деление каналов (*англ*. Band ratio), анализ главных компонент (PCA), минимальная доля шума (MNF) и метод опорных векторов (SVM). Разработан специальный вариант деления каналов, объединяющий данные Sentinel-2A и ASTER, для распознавания серпентиновых минералов в офиолитовом комплексе:  $(S_3+D_9)/(D_{12}+D_8)$ . Цветовые композиции главных компонент данных Sentinel-2A и ASTER и результаты классификации SVM и MNF были использованы для дифференциации пород в офиолитовом комплексе и показали превосходство данных Sentinel-2 по сравнению с данными ASTER для геологического картирования (*puc. 1*).



Рис. 1. Бейшанский офиолитовый пояс (англ. Bieshan, Внутренняя Монголия, Китай). Классификация выходящих на поверхность пород методом опорных векторов (SVM) по данным ASTER и Sentinel-2A: а — по 9 каналам ASTER в диапазонах VNIR, SWIR, цифровая модель рельефа (DEM); б — по изображениям, полученным методом MNF по 9 каналам ASTER, DEM; в — по изображениям, полученным методом MNF по 10 каналам Sentinel-2A, DEM (Ge et al., 2018)

## Поиски месторождений полезных ископаемых

Наибольшее количество работ посвящено изучению гидротермальных изменений пород и выявлению связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Среди них одно из ведущих мест занимают публикации, касающиеся исследования *медно-порфировых систем*, особенно по территории Ирана. Это объясняется тем, что в Иране открыто большое количество медно-порфировых месторождений, располагающихся в пределах пустынных, хорошо обнажённых, лишённых растительности ландшафтах, с большим диапазоном изменённых

минералов, благодаря тому, что эрозией вскрыты разноглубинные части медно-порфировых систем от калиевых до филлитовых, пропиллитовых и аргиллитовых. Часть статей посвящена характеристике известных месторождений в Иране по данным ASTER SWIR, TIR (Farahbakhsh et al., 2016; Mohebi et al., 2015; Safari et al., 2018; Yousefi et al., 2018b); другие направлены на прогноз месторождений на малоизученных площадях на основе экстраполяции данных ASTER SWIR, TIR по известным месторождениям (Alimohammadi et al., 2015; Saadat, 2017; Yazdi et al., 2015; Zadeh, Honarmand, 2017). Приводится пример использования данных ASTER (SWIR, VNIR, TIR) для исследования зон изменённых пород в южной части кайнозойского магматического пояса Урумия-Дохтар, медный пояс Керман (анел. Urumye-Dohtar, Kerman) район Даралу (англ. Daraloo) в Иране, где широко развиты месторождения меди (Cu), молибдена (Mo) и золота (Au) (Alimohammadi et al., 2015). Авторами было выполнено следующее: созданы RGB-композиции по данным SWIR, VNIR для получения изображений с пространственным разрешением 15 м; RGB-изображения по результатам деления каналов для усиления ярозит-филлитовых и аргиллитовых изменений пород и дифференциации вулканических и пирокластических пород, например RGB:  $D_4/D_5$ ,  $D_4/D_6$ ,  $D_4/D_7$  и RGB:  $D_4/D_6$ ,  $D_5/D_8$ ,  $D_3/D_4$  (*puc. 2*); проведена согласованная фильтрация (MF) данных SWIR (*puc. 3*, см. с. 15) и TIR (рис. 4, см. с. 15) и др. В результате получены карты, отражающие распределение минералов (серицита, каолинита, хлорита, эпидота, карбоната, оксидов железа), связанных с зонами гидротермальных изменений в районе месторождений меди.



*Рис. 2.* Область Даралу (*англ.* Daraloo, медный пояс Керман, Иран). RGB-изображение результатов деления каналов ASTER D<sub>4</sub>/D<sub>6</sub>, D<sub>5</sub>/D<sub>8</sub>, D<sub>3</sub>/D<sub>4</sub>. Красная зона с высокими значениями отношения D<sub>4</sub>/D<sub>6</sub> указывает на наличие мусковита и глинистых минералов; зелёная зона с высокими значениями отношения D<sub>5</sub>/D<sub>8</sub> — на присутствие хлорита-эпидота и кальцита; синяя зона с высокими значениями отношения D<sub>3</sub>/D<sub>4</sub> показывает неизменённые породы фундамента. Белыми эллипсами обозначены медно-порфировые месторождения (Alimohammadi et al., 2015)

В пределах того же магматического пояса Урумия-Дохтар (пояс Керман) продемонстрирован большой потенциал для картирования окислов и гидроокислов железа по данным WV-3 при разведке месторождений меди, связанных с порфировым интрузивным комплексом, состоящим из диоритов и гранодиоритов (Touba, Tangestani, 2018). Каналы 2–5 и 8 этого спутника были использованы для опознавания земных покровов, содержащих минералы-индикаторы, и маскирования влияния растительности. Лучшие результаты для картографирования и дифференциации минералов-индикаторов были получены с помощью деления каналов  $(W_8/W_5 - для растительности; W_5(W_5/W_3) + W_2 и W_4(W_2/W_3) - для гётита, лимонита, яро$  $зита; W_5(W_5/W_3) + W_2 - для окислов и гидроокислов железа, где W - каналы WV-3) и клас$ сификации с использованием алгоритма согласованной фильтрации (MF). В результате MFбыли выделены гётит, гематит, лимонит, ярозит.



Рис. 3. Район Даралу – Сармешк (Daraloo – Sarmeshk). Карта распределения минералов, выделенных по результатам обработки данных ASTER SWIR методом согласованной фильтрации, наложенная на изображение ASTER, обработанное методом главных компонент (PCA1): красный цвет — филлиты, синий — аргиллиты, зелёный — пропиллиты; цифрами 1–3 обозначены места отбора проб (Alimohammadi et al., 2015)



*Рис. 4.* Район Даралу – Сармешк (Daraloo – Sarmeshk). Карта распределения силицифицированных изменённых минералов, выделенных по результатам обработки данных ASTER TIR методом согласованной фильтрации, наложенная на изображение ASTER, обработанное методом главных компонент (PCA1). Цифрами 6–8 обозначены места отбора проб в зонах силицификации (Alimohammadi et al., 2015)

На территории пояса Керман (Иран) проведены исследования с использованием обработки данных ASTER (VNIR, SWIR) методом направленной согласованной фильтрации (*англ*. Directed Matched Filtering — DMF) при помощи фильтра, разработанного для хлорита, каолинита, алунита и мусковита на основе спектральной отражательной способности минералов, вместо процесса пороговой обработки, применяемой при MF (Fereydooni, Mojeddifar, 2017). Показаны преимущества DMF по сравнению с методом MF. Сравнение между результатами DMF и полевыми исследованиями показали достоверность распознавания искомых минеральных ассоциаций на 88,51 % территорий.

Несколько работ посвящены прогнозу медно-порфировых месторождений по данным ASTER в Китае (Dai et al., 2018; Zhang, Zhou, 2017; Zhang et al., 2016) и в Монголии (Son et al., 2019).

Среди статей по использованию мульти- и гиперспектральных данных второй по численности является группа, посвящённая исследованию золотого оруденения. В большинстве из этих публикаций акцентируется внимание на описании гидротермальных изменений, связанных с месторождениями золота, и разработке методов прогноза новых объектов, например, в аридных условиях Египта (Abdelnasser et al., 2018; Amer et al., 2016; Salem et al., 2016, 2018). В юго-восточной пустынной части Египта проведена обработка данных ASTER для выделения зон изменений, связанных с золотой минерализацией, методом спектрального угла в комплексе с аэромагнитными данными и данными о разломной тектонике (Hasan et al., 2016). В том же районе Египта выполнены комплексные исследования с использованием спектрального анализа данных ASTER и Sentinel-2 и структурного анализа по радарным данным Sentinel-1 и ALOS PALSAR (Zoheir et al., 2019). В Западной Австралии в районе горы Олимпус (Mt Olympus) по данным ASTER был выделен специфический набор изменённых минералов для осадочных месторождений золота, отличающийся от изменённых минералов в эпитермальных месторождениях (Wells et al., 2016). В Западной Австралии (Олбани-Фрейзер Ороген, англ. Albany-Fraser Orogen) по комбинации спутниковых данных ASTER (VNIR, SWIR и TIR) и данных гиперспектрального сканирования керна в лабораторных условиях (система HyLogging<sup>™</sup>) проводилось выявление золотой минерализации под слоем рыхлых отложений (Laukamp et al., 2016). Прогноз эпитермальных золотосеребряных месторождений на основании закономерностей, выделенных для известных месторождений, проведён в Аргентине (De Palomera et al., 2015) и в Иране (Yousefi et al., 2018а). В Китае по данным ASTER SWIR, TIR выполнено картирование горных пород и определение содержания в них кварца для поисков золотого оруденения (Yao et al., 2017). В Индии для прогноза зон, перспективных на золотосульфидную минерализацию, проведено комплексирование минералогических данных, полученных системой ASTER, магнитной, гравиметрической информации и данных наземной спектроскопии (Rani et al., 2019). Для исследования гидротермальных изменений над рудными месторождениями в Андских Кордильерах использовались данные ASTER, обработанные с использованием методов создания RGB-композиций, анализа главных компонент, получения минеральных индексов по данным каналов SWIR (каолинитового, кальцитового, алунитового) и TIR (кварцевого, карбонатного, силикатного) (Testa et al., 2018).

Сравнение различных алгоритмов обработки данных ASTER (VNIR, SWIR) проведено для картирования зон гидротермальных изменений, связанных с полиметаллической минерализацией (Au-Cu, Ag и/или Pb-Zn) жильного типа в магматическом поясе Торуд – Чахширин (англ. Toroud – Chahshirin, север Ирана), являющегося крупнейшей провинцией с известными месторождениями золота и полиметаллов (Noori et al., 2019). Использовались следующие методы обработки изображений: селективный анализ главных компонент (англ. Selective Principal Component Analysis — SPCA), при котором каналы 1, 2, 4 выбраны для картирования окислов и гидроокислов железа, каналы 4, 5, 6 — для картирования аргиллитовых изменений, каналы 5, 6, 7 — для выделения зон филлитов; матричное преобразование отношения каналов (англ. Band Ratio Matrix Transformation — BRMT); картографирование методом (MTMF). Результаты обработки были сопоставлены с картой гидротермальных изменений минералов на уровне пикселей и субпикселей. Алгоритмы SPCA и BRMT позволили различить

пропиллиты, филлиты, аргиллиты и силикаты в зонах изменений. С помощью алгоритмов SAM и MTMF были обнаружены спектрально доминирующие минеральные группы, такие как мусковит/монтмориллонит/иллит, гематит/ярозит и хлорит/эпидот/кальцит, причём метод MTMF дал более точные результаты. Для проверки результатов проведены полевые работы и лабораторный анализ, включающий рентгеновские, петрографические и спектроскопические исследования.



*Рис. 5.* Магматический пояс Торуд – Чахширин (Toroud – Chahshirin, север Ирана). Результаты классификации методом спектрального угла по данным ASTER (VNIR, SWIR) (Noori et al., 2019)

При разведке месторождений цинка (Zn) и свинца (Pb) в Арктике (Франклинский бассейн, Северная Гренландия) анализ главных компонент и независимый компонентный анализ были применены к некоторым отобранным минеральным индексам Landsat-8 для картирования «железных шляп», глинисто-обогащённых зон и зон доломитизации, а алгоритм согласованной фильтрации со смешанной настройкой (MTMF) был применён к данным ASTER VNIR/SWIR для обнаружения и классификации на субпиксельном уровне гематита, гётита, ярозита, алунита, гипса, халцедона, каолинита, мусковита, хлорита, эпидота, кальцита и доломита на перспективных участках (Pour et al., 2018b). В результате были идентифицированы несколько зон, характеризующихся отчётливым изменением структурных и минеральных комплексов и являющихся высокопотенциальными на открытие месторождений Zn и Pb в исследуемом районе.

В нескольких работах рассматривается использование дистанционных данных (ASTER, ETM, Hiperion) для поисков месторождений *железных руд* в Бразилии (Huang et al., 2019) и Иране (Mansouri et al., 2018; Mazhari et al., 2017).

Метод опорных векторов (SVM) по данным ASTER использовался в Индии для выявления *хромитосодержащих сланцев* в поясе Дхарвар Кратон (*англ*. Dharwar Craton) (Guha et al., 2019b). В этом же докладе приводится пример применения данных ASTER для оконтуривания потенциальных областей развития *кимберлитов* для разведки алмазов в провинции Мадхья-Прадеш (*англ*. Madhya Pradesh) с использованием метода отношения каналов.

Применение данных ASTER TIR для поисков *лития* представлено в работе (Cardoso-Fernandes et al., 2019), а комплекса мультиспектральных (Landsat-ETM, Sentinel-2, ASTER) и радарных (TerraSAR-X, Sentinel-1, ALOS-1) данных в графстве Корнуэлл (*анел*. Cornwall,

юго-запад Англии) — в публикации (Rossi et al., 2018). Вопросам использования данных ASTER для поисков урана в Египте посвящена работа (Shawky et al., 2019).

Эффективность использования данных ASTER (SWIR и TIR), обработанных методами деления каналов, спектрального соответствия (SM) и согласованной фильтрации (MF), в комплексе с топографической информацией рассматривалось для выявления и дифференциации различных типов гидротермально изменённых пород в западной части о. Милос (Греция) (Ferrier et al., 2016). На снимках SWIR чётко идентифицированы изменения аргиллитов и кремнезёма, а на изображениях TIR — изменения силикатных пород. Интегрирование минералогических и топографических данных позволило оценить пространственное и высотное распределение зон изменения.

В докладе (Pendock, McKay, 2019) показано, как тепловые изображения ASTER могли быть использованы для облегчения открытия месторождений полезных ископаемых (медное месторождение Вину (*англ*. Winu) и кобальтовое Гоблин (*англ*. Goblin) в Западной Австралии, золоторудное месторождение Амараско (*англ*. Aamurusko) и медно-никелевое Саратти (*англ*. Saratti) в Финляндии.

Возможности данных WV-3 (SWIR) для картирования каолинита, алунита, биддингтонита, мусковита, кальцита методом частичного спектрального разделения продемонстрированы для района Куприт (англ. Cuprite, штат Невада, США) (Kruse et al., 2015).

Картирование содержания оксидов железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), магния (MgO), алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и никеля (Ni) по данным Sentinel-2 проведено в пределах перидотитового массива в Новой Каледонии (Франция), покрытого латеритовой корой выветривания (Ibrahim et al., 2018). По образцам из скважин изучались химический состав и спектры пород, которые приводились к спектрам по каналам Sentinel-2. Для прогноза содержания химических элементов по изображению Sentinel-2 использовались регрессионные модели. Результаты прогноза показали хорошее совпадение с данными полевых наблюдений.

На территорию Австралии по данным ASTER созданы карты содержания и состава *окиси железа* и *группы Al-содержащих елинистых минералов*, являющихся базой для поисков различных видов полезных ископаемых. При описании этих карт затрагивается вопрос об исключении (маскировании) пикселей, связанных с сухой растительностью — с использованием характеристики поглощения целлюлозы около 2,1 мкм — и с зелёным растительным покровом — на основе вегетационного индекса (NDVI) (Cudahy, 2016). С другой стороны, растительность может использоваться как индикатор месторождений. Отмечено, что над многими месторождениями наблюдается угнетение растительности, в частности, это явление хорошо изучено над месторождениями УВ.

## Прогноз и поиски месторождений углеводородов

При миграции УВ в почвах отмечаются повышенные содержания оксидов и сульфидов железа, кальцита, пирита, уранита, серы, изменённых глинистых минералов, геоботанические и тепловые аномалии. Высокая эффективность использования данных Sentinel-2 для выявления изменённых минералов и аномалий растительности в районах микропросачивания УВ продемонстрирована в Южно-Кишуйском бассейне (Southern Qishui Basin, Китай) (Chen et al., 2019). В обнажённых районах изменённые минералы выделялись с помощью метода деления каналов и анализа главных компонент. В зоне растительности рассчитывались коэффициенты на основе голубого, жёлтого и красного сдвига.

Для прогноза микропросачивания УВ в районе Ямби Меранг (*англ.* Jambi Merang, Индонезия) по данным Sentinel-2 разработаны индексы: минералогические (оксидов железа — SWIR2/SWIR1 и SWIR1/Vegetation Red Edge, а также глинисто-карбонатный SWIR1/ SWIR2) и геоботанические (различные вегетационные и почвенные индексы, индекс содержания хлорофилла) (Putra et al., 2018).

Каналы SWIR сенсора WV-3 (9, 12 и 16 с центрами 1,21; 1,73 и 2,33 мкм соответственно) согласуются с диагностическими характеристиками поглощения УВ при 1,2; 1,7 и 2,3 мкм, что делает возможным его использование *для прямого обнаружения УВ* (Asadzadeh, de Souza Filho, 2016b). Характеристика поглощения УВ в каналах 12, 11 и 13 является достаточно устойчивой и сохраняется в различных условиях, что в потенциале делает возможным разведку УВ и мониторинг окружающей среды.

Прогнозу залежей УВ по данным ASTER (VNIR, SWIR) с использованием алгоритмов выявления целей на основе обучения и спектрального разделения посвящена работа по северо-восточной Анатолии (Турция) (Soydan et al., 2019).

Для выявления УВ в почвах отмечены перспективы тепловых диапазонов (Pelta, Ben-Dor, 2019).

#### Геоэкологический мониторинг

Мульти- и гиперспектральные данные, получаемые современными спутниковыми системами и характеризующиеся высоким пространственным и временным разрешением, могут с успехом использоваться для исследования воздействия на ландшафты разработки месторождений полезных ископаемых, мониторинга отходов горной промышленности и природных катастрофических процессов. Для определения эффективности разрабатываемого для этих целей инструмента HyspIRI были проведены авиационные наблюдения на территории Южной Калифорнии (Calvin, Pace, 2016). Авторами предложен быстрый способ определения минералов (каолинита, алунита, мусковита, илита, хлорита, кальцита, эпидота, опала) с использованием метода декорреляционного растяжения (*англ.* decorrelation stretch — DCS) данных SWIR (каналов с длиной волны 2,16; 2,21 и 2,24 мкм, представленных как RGB) и алгоритмов минимальной доли шума и индекса чистоты пиксела. Для картирования кварцсодержащих пород и базальтовых выходов TIR-данные в диапазонах 10,63; 9,03 и 8,60 мкм обрабатывались методом декорреляционного растяжения тепловых каналов. Данные TIR использовались также для выявления тепловых аномалий, в том числе связанных с мелкими фумаролами.

Гиперспектральная система Hyperion использовалась для мониторинга отходов горной промышленности (золоторудных, платиновых и железистых) (Mielke et al., 2014, 2016). Отмечено, что наилучшие результаты могут быть получены при объединении данных Hyperion с данными Sentinel-2, ASTER, ETM и смоделированными авиационными данными будущего спутника EnMAP. Высокие перспективы для мониторинга отходов горной промышленности имеют проектируемые гиперспектральные системы SHALOM и HypXIM с пространственным разрешением 10 м.

#### Заключение

Анализ зарубежных публикаций за последние годы показывает повышенный интерес мирового сообщества к использованию мульти- и гиперспектральных данных при геологических исследованиях и поисках МПИ. Наиболее часто используемыми космическими данными для решения этих задач являются данные системы ASTER (VNIR, SWIR, TIR). Данные VNIR и SWIR важны для изучения гидротермальных изменений пород при поисках рудных месторождений и геохимических изменений под действием просачивающихся УВ. VNIR-диапазон позволяет выявлять аномалии, содержащие окислы и гидроокислы железа, и геоботанические аномалии. В SWIR-диапазоне диагностируется содержание анионных групп, таких как Al-OH, Mg-OH, Fe-OH, Si-OH, карбонатов, аммония и сульфатов. Данные тепловых диапазонов (TIR) имеют специфические полосы поглощения для силикатных пород и кварца, а также могут способствовать обнаружению месторождений УВ.

Данные Sentinel-2 и WV-3 являются перспективными для геологических исследований благодаря дополнительным каналам в областях VNIR и SWIR. Кроме выявления геохимических аномалий при поисках рудных месторождений и месторождений УВ эти данные перспективны для выявления геоботанических аномалий над залежами. Три дополнительных красных канала (Red Edge) Sentinel-2 и жёлтый, крайний красный и два ближних инфракрасных

канала WV-3 чувствительны к изменениям хлорофилла и позволяют выделить угнетение растительности.

Для региональных исследований и геоэкологического мониторинга продолжают оставаться актуальными данные Landsat, позволяющие выделять складчатые структуры, разломы и различные типы пород, а имеющийся архив данных может быть использован для прослеживания изменений, связанных с разработкой месторождений.

Отмечены значительные достижения в обработке мульти- и гиперспектральных данных, осуществляемой как традиционными методами, так и по новым и усовершенствованным алгоритмам для повышения тематической информативности за счёт усиления полезного сигнала. Разрабатываются методы атмосферных коррекций, новые спектральные индексы, усовершенствованные алгоритмы классификаций. Для открытых аридных территорий преимущества спектрометрического метода очевидны, и использование методов деления каналов (получения спектральных индексов), метода главных компонент и методов классификации (спектрального угла, согласованной фильтрации, опорных векторов и др.) позволяют получить положительные результаты для геологического картирования и поисков МПИ. 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. На закрытых территориях применение спектрометрического метода осложняется наличием растительного покрова и рыхлых четвертичных отложений, перекрывающих коренные породы и месторождения. Для решения этих проблем проводятся работы по устранению влияния растительности на основе вегетационных индексов, маскирования пикселей, связанных с сухой растительностью. С другой стороны, изменения растительности и геохимические аномалии в почвах рассматривается как индикаторы гидротермально-изменённых пород и пород, испытывающих влияние мигрирующих углеводородных флюидов. Однако наряду с аномалиями, которые соответствуют месторождениям, могут быть обнаружены ложные аномалии. Поэтому для закрытых территорий требуется анализ разномасштабных спутниковых данных, использование нескольких методов их обработки и выделение перспективных объектов на основе максимумов совпадений выделенных аномалий. Необходимо развитие методов выявления геохимических и геоботанических аномалий.

Как показывает анализ публикаций и опыт работ Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского, наиболее интересные результаты могут быть получены при комплексном анализе разномасштабных мульти- и гиперспектральных снимков (ASTER, Sentinel-2, WorldView-3 и др.) с привлечением радарных данных для выявления структурного контроля месторождений. Комплексирование дистанционных данных с данными наземной проверки и бурения позволяет увеличить глубинность исследований и оказать помощь в прогнозировании скрытых и глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых.

В целом отмечены высокие перспективы использования мульти- и гиперспектральных данных для геологического картирования, выявления зон гидротермальных изменений пород и поисков месторождений меди, золота, полиметаллов, УВ и др., а также геоэкологического мониторинга, особенно с появлением готовящихся к запуску новых гиперспектральных космических систем.

## Литература

- Abdelnasser A., Kumral M., Zoheir B., Karaman M. REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt // J. African Earth Sciences. 2018. V. 145. P. 317–330.
- 2. *Abrams M., Yamaguchi Y.* Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration // Remote Sensing. 2019. V. 11(11). 1394. 28 p. DOI: 10.3390/rs11111394.
- 3. *Alimohammadi M., Alirezaei S., Kontak D. J.* Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo–Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran // Ore Geology Reviews. 2015. V. 70. P. 290–304.

- 4. *Amer R., El Mezayen A., Hasanein M.* ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization // Ore Geology Reviews. 2016. V. 75. P. 239–251.
- 5. *Asadzadeh S., de Souza Filho C. R.* (2016a) A review on spectral processing methods for geological remote sensing // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 47. P. 69–90.
- 6. *Asadzadeh S., de Souza Filho C. R.* (2016b) Investigating the capability of WorldView-3 superspectral data for direct hydrocarbon detection // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 173. P. 162–173.
- 7. *Calvin W. M.*, *Pace E. L.* Utilizing HyspIRI Prototype Data for Geological Exploration Applications: A Southern California Case Study // Geosciences. 2016. V. 6(11). 14 p. DOI: 10.3390/geosciences6010011.
- 8. *Cardoso-Fernandes J., Teodoro A., Lima A.* Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 76. P. 10–25.
- 9. *Chen L., Yang X., Zhen G.* Potential of Sentinel-2 data for alteration extraction in coal-bed methane reservoirs // Ore Geology Reviews. 2019. V. 108. P. 134–146. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.009.
- Cudahy T. Mineral Mapping for Exploration: An Australian Journey of Evolving Spectral Sensing Technologies and Industry Collaboration // Geosciences. 2016. V. 6(52). DOI: 10.3390/ geosciences6040052.
- Dai J., Qu X., Song Y. Porphyry Copper Deposit Prognosis in the Middle Region of the Bangonghu-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet, Using ASTER Remote Sensing Data // Resource Geology. 2018. V. 68. P. 65–82.
- 12. *De Palomera P., van Ruitenbeek F., Carranza E.* Prospectivity for epithermal gold-silver deposits in the Deseado Massif, Argentina // Ore Geology Reviews. 2015. V. 71. P. 484–501.
- 13. *Farahbakhsh E., Shirmard H., Bahroudi A.* Fusing ASTER and QuickBird-2 Satellite Data for Detailed Investigation of Porphyry Copper Deposits Using PCA; Case Study of Naysian Deposit, Iran // J. Indian Society of Remote Sensing. 2016. V. 44. P. 525–537.
- 14. *Fereydooni H.*, *Mojeddifar S*. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. V. 61. P. 1–13.
- Ferrier G., Naden J., Ganas A., Kemp S., Pope R. Identification of Multi-Style Hydrothermal Alteration Using Integrated Compositional and Topographic Remote Sensing Datasets // Geosciences. 2016. V. 6. P. 36.
- 16. *Ge W.*, *Cheng Q.*, *Tang Y.*, *Jing L.*, *Gao C.* Lithological discrimination using ASTER and Sentinel-2A in the Shibanjing ophiolite complex of Beishan orogenic in Inner Mongolia, China // Advances in Space Research. July 2018. DOI: 10.1016/j.asr.2018.06.036.
- Guha A., Kumar V. New ASTER derived thermal indices to delineate mineralogy of different granitoids of Archaean Craton and analysis of their potentials with reference to Ninomiya's indices for delineating quartz and mafic minerals of granitoids-an analysis in Dharwar Craton, India // Ore Geology Reviews. 2016. V. 74. P. 76–87.
- Guha A., Kumar V., Porwal A., Rani K., Singaraju V., Singh R. P., Khandelwal M. K., Raju P. V., Diwakar P. G. (2019a) Reflectance spectroscopy and ASTER based mapping of rock-phosphate in parts of Paleoproterozoic sequences of Aravalli Group of rocks, Rajasthan, India // Ore Geology Reviews. 2019. V. 108. P. 73– 87. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.02.021.
- 19. *Guha A., Kumar K. V., Rao P., Yamaguchi Y.* (2019b) ASTER and mineral exploration Indian experiences with few case studies on different types of mineral deposits // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2019). 2019. P. 5579–5582.
- Guha A., Yamaguchi Y., Chatterjee S., Rani K., Kumar V. (2019c) Emittance Spectroscopy and Broadband Thermal Remote Sensing Applied to Phosphorite and Its Utility in Geoexploration: A Study in the Parts of Rajasthan, India // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 1003.
- Hasan E., Fagin T., El Alfy Z. Spectral Angle Mapper and aeromagnetic data integration for gold-associated alteration zone mapping: A case study for the Central Eastern Desert Egypt // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 8. P. 1762–1776. DOI: 10.1080/01431161.2016.1165887.
- 22. *Hassan S. M., Sadek M. F.* Geological mapping and spectral based classification of basement rocks using remote sensing data analysis: The Korbiai-Gerf nappe complex, South Eastern Desert, Egypt // J. African Earth Sciences. 2017. V. 134. P. 404–418.
- 23. *Huang S., Chen S., Zhang Y.* Comparison of altered mineral information extracted from ETM plus, ASTER and Hyperion data in aguas Claras iron ore, Brazil // IET Image Proc. 2019. V. 13. P. 355–364.
- 24. *Ibrahim E., Barnabé P., Ramanaidou E., Pirard E.* Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in new Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 73. P. 653–665.
- 25. *Kruse F.A., Baugh W.M., Perry S.L.* Validation of Digital Globe WorldView-3 Earth Imaging Satellite Shortwave Infrared (SWIR Bands) for Mineral Mapping // J. Applied Remote Sensing. 2015. V. 9(1). DOI: 10.1117/1.JRS.9.096044.

- 26. *Kumara C., Shettya A., Ravalb S., Sharmac R., Champati Rayc P.K.* Lithological Discrimination and Mapping using ASTER SWIR Data in the Udaipur area of Rajasthan, India // Earth and Planetary Science Global Challenges, Policy Framework and Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF'2015): Proc. Conf. 2015. V. 11. P. 180–188.
- Laukamp C., Salama W., González-Álvarez I. Proximal and remote spectroscopic characterization of regolith in the Albany-Fraser Orogen (Western Australia) // Ore Geology Reviews. 2016. V. 73(3). P. 540–554. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.003.
- 28. *Mansouri E., Feizi F., Rad A., Arian M.* Remote-sensing data processing with the multivariate regression analysis method for iron mineral resource potential mapping: A case study in the Sarvian area, Central Iran // Solid Earth. 2018. V. 9. P. 373–384.
- Mazhari N., Shafaroudi A., Ghaderi M. Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data // Geosciences. 2017. V. 21. P. 137–148.
- 30. *Mielke C., Boesche N. K., Rogass C., Kaufmann H., Gauert C., de Wit M.* Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion OLI and EnMAP/Sentinel-2 // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 6790–6816.
- 31. *Mielke C., Rogass C., Boesche N., Segl K., Altenberger U.* EnGeoMAP 2.0 automated hyperspectral mineral identification for the German EnMAP space mission // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 127.
- 32. *Mohebi A., Mirnejad H., Lentz D.* Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, southeast of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data // Ore Geology Reviews. 2015. V. 69. P. 187–198.
- 33. *Ninomiya Y., Fu B.* Regional Lithological Mapping Using ASTER-TIR Data: Case Study for the Tibetan Plateau and the Surrounding Area // Geosciences. 2016. V. 6. P. 39.
- 34. *Ninomiya Y., Fu B.* Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials // Ore Geology Reviews. 2019. V. 108. P. 54–72.
- 35. Noori L., Pour A. B., Askari G., Taghipour N., Pradhan B., Lee C. W., Honarmand M. Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud–Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 495. DOI: 10.3390/rs11050495.
- 36. *Pelta R., Ben-Dor E.* An Exploratory Study on the Effect of Petroleum Hydrocarbon on Soils Using Hyperspectral Longwave Infrared Imagery // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 569.
- Pendock N., McKay A. Use of Thermal Infrared Remote Sensing for Targeting Mineral Deposites // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2019). 2019. P. 5678–5681. DOI: 10/1109/ IGARSS.2019.8898771.
- Pour A. B., Park Y., Park T. S., Hong J. K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. (2018a) Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions // Geocarto Intern. 2018. P. 1–64. DOI: 10.1080/10106049.2018.1434684.
- 39. *Pour A. B., Park T. S., Park Y., Hong J. K. Zoheir B., Pradhan B., Ayoobi I., Hashim M.* (2018b) Application of Multi-Sensor Satellite Data for Exploration of Zn-Pb Sulfide Mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 1186.
- 40. *Pour A. B., Hashim M., Hong J. K., Park Y.* Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: north-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula // Ore Geology Reviews. 2019. V. 108. P. 112–133.
- 41. *Putra M. I. J.*, *Supriatna, Asriningum W.* Hydrocarbon Microseepage Potential Area Exploration Using Sentinel 2 Imagery // 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. Energy, Environmental and Information System (ICENIS'2018). 2018. V. 73. 03021. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20187303021.
- 42. *Rajendrana S.*, *Nasirb S.* ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // Ore Geology Reviews. 2019. V. 108. P. 33–53.
- 43. *Rani K., Guha A., Mondal S., Pal S., Kumar K.* ASTER multispectral bands, ground magnetic data, ground spectroscopy and space-based EIGEN6C4 gravity data model for identifying potential zones for gold sulphide mineralization in Bhukia, Rajasthan, Indian // J. Applied Geophysics. 2019. V. 160. P. 28–46.
- 44. *Rossi C., Spittle S., Bayaraa M., Pandey A., Henry N.* An Earth Observation Framework for the Lithium Exploration // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2018). 2018. P. 1616–1619. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519410.
- 45. *Saadat S.* Comparison of various knowledge-driven and logistic-based mineral prospectivity methods to generate Cu and Au exploration targets Case study: Feyz-Abad area (North of Lut block, NE Iran) // J. Mining and Environment. 2017. V. 8. P. 611–619.
- 46. *Safari M.*, *Maghsoudi A.*, *Pour A*. Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: A case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran // Geocarto Intern. 2018. V. 33. P. 1186–1201.

- 47. *Salem S., El Sharkawi M., El-Alfy Z., Soliman N., Ahmed S.* Exploration of gold occurrences in alteration zones at Dungash district, Southeastern Desert of Egypt using ASTER data and geochemical analyses // J. African Earth Sciences. 2016. V. 117. P. 389–400.
- Salem S., El Sharkawi M., El Alfy Z., Ahmed S. The use of ASTER data and geochemical analyses for the exploration of gold at Samut area, South Eastern Desert of Egypt // Arabian J. Geosciences. 2018. V. 11. P. 11–18.
- 49. *Shawky M., El-Arafy R., El Zalaky M.* Validating (MNF) transform to determine the least inheren dimensionality of ASTER image data of some uranium localities at Central Eastern Desert. Egypt // J. African Earth Sciences. 2019. V. 149. P. 441–450.
- 50. Son Y.-S., Kim K.-E., Yoon W.-J., Cho S.-J. Regional mineral mapping of island arc terranes in southeastern Mongolia using multi-spectral remote sensing data // Ore Geology Reviews. 2019. V. 113. 103106. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103106.
- Soydan H., Koz A., Duzgun H. Identification of hydrocarbon microseepage induced alterations with spectral target detection and unmixing algorithms // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 74. P. 209–221.
- 52. *Testa F.J.*, *Villanueva C.*, *Cooke D. R.*, *Zhang L*. Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 203. DOI: 10.3390/rs10020203.
- 53. *Touba S., Tangestani M. H.* Large-scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using WorldView-3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 73. P. 156–169.
- 54. *Transon J.*, *D'Andrimont R.*, *Maugnard A.*, *Defourny P.* Survey of Hyperspectral Earth Observation Applications from Space in the Sentinel-2 Context // Remote Sensing. 2018. V. 10(2). P. 157.
- 55. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 148. P. 124–133.
- Wells M., Laukamp C., Hancock E. Reflectance spectroscopic characterisation of mineral alteration footprints associated with sediment-hosted gold mineralisation at Mt Olympus (Ashburton Basin, Western Australia) // Australian J. Earth Science. 2016. V. 63. P. 987–1002.
- Yao K., Pradhan B., Idrees M. Identification of Rocks and Their Quartz Content in Gua Musang Goldfield Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Imagery // J. Sensors. 2017. 8 p. DOI: 10.1155/2017/6794095.
- 58. *Yazdi Z., Rad A., Ajayebi K.* Analysis and modeling of geospatial datasets for porphyry copper prospectivity mapping in Chahargonbad area, Central Iran // Arabian J. Geosciences. 2015. V. 8. P. 8237–8248.
- 59. Ye B., Tian S., Ge J., Sun Y. Assessment of WorldView-3 Data for Lithological Mapping // Remote Sensing. 2017. V. 9. P. 1132. DOI: 10.3390/rs9111132.
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A. (2018a) Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: A case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // Arabian J. Geosciences. 2018. V. 11. P. 482–499.
- Yousefi S. J., Ranjbar H., Alirezaei S., Dargahi S. (2018b) Discrimination of Sericite Phyllic and Quartz-Rich Phyllic Alterations by Using a Combination of ASTER TIR and SWIR Data to Explore Porphyry Cu Deposits Hosted by Granitoids, Kerman Copper Belt, Iran // J. Indian Society of Remote Sensing. 2018. V. 46. P. 717–727.
- 62. Zadeh M., Honarmand M. A remote sensing-based discrimination of high- and low-potential mineralization for porphyry copper deposits; a case study from Dehaj-Sarduiyeh copper belt, SE Iran // European J. Remote Sensing. 2017. V. 50. P. 332–342.
- 63. *Zhang N., Zhou K.* Identification of hydrothermal alteration zones of the Baogutu porphyry copper deposits in northwest China using ASTER data // J. Applied Remote Sensing. 2017. V. 11(1). 015016. DOI: 10.1117/1.JRS.11.015016.
- 64. *Zhang T., Yi G., Li H.* Integrating Data of ASTER and Landsat-8 OLI (AO) for Hydrothermal Alteration Mineral Mapping in Duolong Porphyry Cu-Au Deposit, Tibetan Plateau, China // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 890.
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M., Soliman N. Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 1450. DOI: 10.3390/ rs11121450.

# A review of the past 5 years of international advances in multi- and hyperspectral satellite data application and processing techniques in geological research

# I.O. Smirnova, A.A. Kirsanov, N.V. Kamyshnikova

### A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg 199106, Russia E-mail: sio\_iv@mail.ru

In recent years, there has been a growing interest worldwide in using multi- and hyperspectral remote sensing data in geological research. This is due to the improvement of equipment installed on satellites, preparations for launch of new satellites as well as development of new processing methods. The paper reviews the publications appeared abroad over the past 5 years that are devoted to the usage and advanced processing techniques of multi- and hyperspectral satellite data intended for solving geological problems. Processing carried out both by traditional methods and new and improved algorithms is considered. The main achievements in the field of geological mapping, study of hydrothermal rock alterations, mineral exploration (copper-porphyry deposits, gold ore, polymetallic ore, hydrocarbons deposits, etc.) and geoecological monitoring using data obtained by various satellite systems (ASTER, WorldView-3, Sentinel-2, Hyperion et al.) are highlighted. The advantages of using the spectrometric method in open arid areas and its limitations in unexposed areas are shown. The state of the art and prospects of remote sensing methods in geological research are characterized.

**Keywords:** remote sensing, satellite, multi- and hyperspectral data, processing methods, geological mapping, hydrothermal rock alterations, mineral exploration

Accepted: 23.01.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-9-27

## References

- 1. Abdelnasser A., Kumral M., Zoheir B., Karaman M., REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt, *J. African Earth Sciences*, 2018, Vol. 145, pp. 317–330.
- 2. Abrams M., Yamaguchi Y., Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(11), 1394, 28 p., DOI: 10.3390/rs1111394.
- 3. Alimohammadi M., Alirezaei S., Kontak D.J., Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo–Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran, *Ore Geology Reviews*, 2015, Vol. 70, pp. 290–304.
- 4. Amer R., El Mezayen A., Hasanein M., ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization, *Ore Geology Reviews*, 2016, Vol. 75, pp. 239–251.
- 5. Asadzadeh S., de Souza Filho C. R. (2016a), A review on spectral processing methods for geological remote sensing, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 47, pp. 69–90.
- 6. Asadzadeh S., de Souza Filho C. R. (2016b), Investigating the capability of WorldView-3 superspectral data for direct hydrocarbon detection, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 173, pp. 162–173.
- 7. Calvin W. M., Pace E. L., Utilizing HyspIRI Prototype Data for Geological Exploration Applications: A Southern California Case Study, *Geosciences*, 2016, Vol. 6(11), 14 p., DOI: 10.3390/geosciences6010011.
- 8. Cardoso-Fernandes J., Teodoro A., Lima A., Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 76, pp. 10–25.
- 9. Chen L., Yang X., Zhen G., Potential of Sentinel-2 data for alteration extraction in coal-bed methane reservoirs, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 108, pp. 134–146, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.009.
- 10. Cudahy T., Mineral Mapping for Exploration: An Australian Journey of Evolving Spectral Sensing Technologies and Industry Collaboration, *Geosciences*, 2016. Vol. 6(52), DOI: 10.3390/geosciences6040052.
- Dai J., Qu X., Song Y., Porphyry Copper Deposit Prognosis in the Middle Region of the Bangonghu-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet, Using ASTER Remote Sensing Data, *Resource Geology*, 2018, Vol. 68, pp. 65–82.
- 12. De Palomera P., van Ruitenbeek F., Carranza E., Prospectivity for epithermal gold-silver deposits in the Deseado Massif, Argentina, *Ore Geology Reviews*, 2015, Vol. 71, pp. 484–501.

- 13. Farahbakhsh E., Shirmard H., Bahroudi A., Fusing ASTER and QuickBird-2 Satellite Data for Detailed Investigation of Porphyry Copper Deposits Using PCA; Case Study of Naysian Deposit, Iran, *J. Indian Society of Remote Sensing*, 2016, Vol. 44, pp. 525–537.
- 14. Fereydooni H., Mojeddifar S., A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 61, pp. 1–13.
- Ferrier G., Naden J., Ganas A., Kemp S., Pope R., Identification of Multi-Style Hydrothermal Alteration Using Integrated Compositional and Topographic Remote Sensing Datasets, *Geosciences*, 2016, Vol. 6, p. 36.
- 16. Ge W., Cheng Q., Tang Y., Jing L., Gao C., Lithological discrimination using ASTER and Sentinel-2A in the Shibanjing ophiolite complex of Beishan orogenic in Inner Mongolia, China, *Advances in Space Research*, July 2018, DOI: 10.1016/j.asr.2018.06.036.
- Guha A., Kumar V., New ASTER derived thermal indices to delineate mineralogy of different granitoids of Archaean Craton and analysis of their potentials with reference to Ninomiya's indices for delineating quartz and mafic minerals of granitoids-an analysis in Dharwar Craton, India, *Ore Geology Reviews*, 2016, Vol. 74, pp. 76–87.
- Guha A., Kumar V., Porwal A., Rani K., Singaraju V., Singh R. P., Khandelwal M. K., Raju P. V., Diwakar P. G. (2019a), Reflectance spectroscopy and ASTER based mapping of rock-phosphate in parts of Paleoproterozoic sequences of Aravalli Group of rocks, Rajasthan, India, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 108, pp. 73–87, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.02.021.
- 19. Guha A., Kumar K. V., Rao P., Yamaguchi Y. (2019b), ASTER and mineral exploration Indian experiences with few case studies on different types of mineral deposits, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* (*IGARSS'2019*), 2019, pp. 5579–5582.
- Guha A., Yamaguchi Y., Chatterjee S., Rani K., Kumar V. (2019c), Emittance Spectroscopy and Broadband Thermal Remote Sensing Applied to Phosphorite and Its Utility in Geoexploration: A Study in the Parts of Rajasthan, India, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, p. 1003.
- Hasan E., Fagin T., El Alfy Z., Spectral Angle Mapper and aeromagnetic data integration for gold-associated alteration zone mapping: A case study for the Central Eastern Desert Egypt, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 8, pp. 1762–1776, DOI: 10.1080/01431161.2016.1165887.
- 22. Hassan S. M., Sadek M. F., Geological mapping and spectral based classification of basement rocks using remote sensing data analysis: The Korbiai-Gerf nappe complex, South Eastern Desert, Egypt, *J. African Earth Sciences*, 2017, Vol. 134, pp. 404–418.
- 23. Huang S., Chen S., Zhang Y., Comparison of altered mineral information extracted from ETM plus, ASTER and Hyperion data in aguas Claras iron ore, Brazil, *IET Image Proc.*, 2019, Vol. 13, pp. 355–364.
- 24. Ibrahim E., Barnabé P., Ramanaidou E., Pirard E., Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in new Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, Vol. 73, pp. 653–665.
- 25. Kruse F.A., Baugh W.M., Perry S.L., Validation of Digital Globe WorldView-3 Earth Imaging Satellite Shortwave Infrared (SWIR Bands) for Mineral Mapping, *J. Applied Remote Sensing*, 2015, Vol. 9(1), DOI: 10.1117/1.JRS.9.096044.
- Kumara C., Shettya A., Ravalb S., Sharmac R., Champati Rayc P.K., Lithological Discrimination and Mapping using ASTER SWIR Data in the Udaipur area of Rajasthan, India, *Earth and Planetary Science Global Challenges, Policy Framework and Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF'2015)*: Proc. Conf., 2015, Vol. 11, pp. 180–188.
- Laukamp C., Salama W., González-Álvarez I., Proximal and remote spectroscopic characterization of regolith in the Albany-Fraser Orogen (Western Australia), *Ore Geology Reviews*, 2016, Vol. 73(3), pp. 540– 554, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.003.
- 28. Mansouri E., Feizi F., Rad A., Arian M., Remote-sensing data processing with the multivariate regression analysis method for iron mineral resource potential mapping: A case study in the Sarvian area, Central Iran, *Solid Earth*, 2018, Vol. 9, pp. 373–384.
- 29. Mazhari N., Shafaroudi A., Ghaderi M., Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data, *Geosciences*, 2017, Vol. 21, pp. 137–148.
- Mielke C., Boesche N. K., Rogass C., Kaufmann H., Gauert C., de Wit M., Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion OLI and EnMAP/Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 6790–6816.
- 31. Mielke C., Rogass C., Boesche N., Segl K., Altenberger U., EnGeoMAP 2.0 automated hyperspectral mineral identification for the German EnMAP space mission, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, p. 127.
- 32. Mohebi A., Mirnejad H., Lentz D., Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, southeast of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data, *Ore Geology Reviews*, 2015, Vol. 69, pp. 187–198.

- 33. Ninomiya Y., Fu B., Regional Lithological Mapping Using ASTER-TIR Data: Case Study for the Tibetan Plateau and the Surrounding Area, *Geosciences*, 2016, Vol. 6, p. 39.
- 34. Ninomiya Y., Fu B., Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 108, pp. 54–72.
- 35. Noori L., Pour A. B., Askari G., Taghipour N., Pradhan B., Lee C.-W., Honarmand M., Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud–Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, p. 495, DOI: 10.3390/rs11050495.
- 36. Pelta R., Ben-Dor E., An Exploratory Study on the Effect of Petroleum Hydrocarbon on Soils Using Hyperspectral Longwave Infrared Imagery, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, p. 569.
- Pendock N., McKay A., Use of Thermal Infrared Remote Sensing for Targeting Mineral Deposites, Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2019), 2019, pp. 5678–5681, DOI: 10.1109/ IGARSS.2019.8898771.
- 38. Pour A. B., Park Y., Park T. S., Hong J. K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. (2018a), Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions, *Geocarto Intern.*, 2018, pp. 1–64, DOI:10.1080/10106049.2018.1434684.
- 39. Pour A. B., Park T. S., Park Y., Hong J. K. Zoheir B., Pradhan B., Ayoobi I., Hashim M. (2018b), Application of Multi-Sensor Satellite Data for Exploration of Zn–Pb Sulfide Mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, p. 1186.
- 40. Pour A. B., Hashim M., Hong J. K., Park Y., Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: northeastern Graham Land, Antarctic Peninsula, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 108, pp. 112–133.
- 41. Putra M. I. J., Supriatna, Asriningum W., Hydrocarbon Microseepage Potential Area Exploration Using Sentinel 2 Imagery, 3<sup>rd</sup> Intern Conf. Energy, Environmental and Information System (ICENIS'2018), Vol. 73, 03021, 5 p., DOI: 10.1051/e3sconf/20187303021.
- 42. Rajendrana S., Nasirb S., ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 108, pp. 33–53.
- 43. Rani K., Guha A., Mondal S., Pal S., Kumar K., ASTER multispectral bands, ground magnetic data, ground spectroscopy and space-based EIGEN6C4 gravity data model for identifying potential zones for gold sulphide mineralization in Bhukia, Rajasthan, Indian, *J. Applied Geophysics*, 2019, Vol. 160, pp. 28–46.
- 44. Rossi C., Spittle S., Bayaraa M., Pandey A., Henry N., An Earth Observation Framework for the Lithium Exploration, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2018)*, 2018, pp. 1616–1619, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519410.
- 45. Saadat S., Comparison of various knowledge-driven and logistic-based mineral prospectivity methods to generate Cu and Au exploration targets Case study: Feyz-Abad area (North of Lut block, NE Iran), *J. Mining and Environment*, 2017, Vol. 8, pp. 611–619.
- Safari M., Maghsoudi A., Pour A., Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: A case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran, *Geocarto Intern.*, 2018, Vol. 33, pp. 1186–1201.
- 47. Salem S., El Sharkawi M., El-Alfy Z., Soliman N., Ahmed S., Exploration of gold occurrences in alteration zones at Dungash district, Southeastern Desert of Egypt using ASTER data and geochemical analyses, *J. African Earth Sciences*, 2016, Vol. 117, pp. 389–400.
- 48. Salem S., El Sharkawi M., El Alfy Z., Ahmed S., The use of ASTER data and geochemical analyses for the exploration of gold at Samut area, South Eastern Desert of Egypt, *Arabian J. Geosciences*, 2018, Vol. 11, pp. 11–18.
- 49. Shawky M., El-Arafy R., El Zalaky M., Validating (MNF) transform to determine the least inheren dimensionality of ASTER image data of some uranium localities at Central Eastern Desert. Egypt, *J. African Earth Sciences*, 2019, Vol. 149, pp. 441–450.
- 50. Son Y.-S., Kim K.-E., Yoon W.-J., Cho S.-J., Regional mineral mapping of island arc terranes in southeastern Mongolia using multi-spectral remote sensing data, *Ore Geology Reviews*, 2019, Vol. 113, 103106, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103106.
- 51. Soydan H., Koz A., Duzgun H., Identification of hydrocarbon microseepage induced alterations with spectral target detection and unmixing algorithms, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 74, pp. 209–221.
- 52. Testa F.J., Villanueva C., Cooke D.R., Zhang L., Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, p. 203, DOI: 10.3390/rs10020203.
- 53. Touba S., Tangestani M. H., Large-scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using WorldView-3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, Vol. 73, pp. 156–169.

- 54. Transon J., D'Andrimont R., Maugnard A., Defourny P., Survey of Hyperspectral Earth Observation Applications from Space in the Sentinel-2 Context, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(2), p. 157.
- 55. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 148, pp. 124–133.
- Wells M., Laukamp C., Hancock E., Reflectance spectroscopic characterisation of mineral alteration footprints associated with sediment-hosted gold mineralisation at Mt Olympus (Ashburton Basin, Western Australia), *Australian J. Earth Science*, 2016, Vol. 63, pp. 987–1002.
- Yao K., Pradhan B., Idrees M., Identification of Rocks and Their Quartz Content in Gua Musang Goldfield Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Imagery, J. Sensors, 2017, 8 p., DOI: 10.1155/2017/6794095.
- 58. Yazdi Z., Rad A., Ajayebi K., Analysis and modeling of geospatial datasets for porphyry copper prospectivity mapping in Chahargonbad area, Central Iran, *Arabian J. Geosciences*, 2015, Vol. 8, pp. 8237–8248.
- 59. Ye B., Tian S., Ge J., Sun Y., Assessment of WorldView-3 Data for Lithological Mapping, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, p. 1132, DOI: 10.3390/rs9111132.
- 60. Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A. (2018a), Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: A case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran, *Arabian J. Geosciences*, 2018, Vol. 11, pp. 482–499.
- 61. Yousefi S.J., Ranjbar H., Alirezaei S., Dargahi S. (2018b), Discrimination of Sericite Phyllic and Quartz-Rich Phyllic Alterations by Using a Combination of ASTER TIR and SWIR Data to Explore Porphyry Cu Deposits Hosted by Granitoids, Kerman Copper Belt, Iran, *J. Indian Society of Remote Sensing*, 2018, Vol. 46, pp. 717–727.
- 62. Zadeh M., Honarmand M., A remote sensing-based discrimination of high- and low-potential mineralization for porphyry copper deposits; a case study from Dehaj-Sarduiyeh copper belt, SE Iran, *European J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 50, pp. 332–342.
- 63. Zhang N., Zhou K., Identification of hydrothermal alteration zones of the Baogutu porphyry copper deposits in northwest China using ASTER data, *J. Applied Remote Sensing*, 2017, Vol. 11(1), 015016, DOI: 10.1117/1.JRS.11.015016.
- 64. Zhang T., Yi G., Li H., Integrating Data of ASTER and Landsat-8 OLI (AO) for Hydrothermal Alteration Mineral Mapping in Duolong Porphyry Cu-Au Deposit, Tibetan Plateau, China, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, p. 890.
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M., Soliman N., Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, p. 1450, DOI: 10.3390/ rs11121450.