

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ДЕТАЛЬНОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОЛОН-ОВООТСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО УЗЛА (ЮЖНАЯ МОНГОЛИЯ) НА ОСНОВЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМОСНИМКОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2019 г. М. В. Задорожный<sup>1</sup>, И. Д. Зольников<sup>1,2</sup>, Н. В. Глушкова<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

\*E-mail: hope@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

В статье изложены результаты дешифрирования территории Олон-Овоотского рудного узла по космическим снимкам среднего и высокого пространственного разрешения. В качестве основы дешифрирования был выбран снимок Sentinel-2, который был подвергнут орторектификации и приведен к единому пространственному разрешению (10 м). Для выделения площадных объектов использованы индексы гидроксида железа и силиката железа на снимках Sentinel-2. Для выделения участков сгущения кварц-карбонатных жил на снимках Sentinel-2 анализировалась субпиксельная структура на основе привлечения к дешифрированию космоснимков высокого пространственного разрешения из информационного ресурса GoogleEarth. Для структурно-морфологического дешифрирования с выделением линеаментов оказалось не обязательным исследование спектрального домена на снимках высокого разрешения. Дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли позволило существенно уточнить геологическое строение территории и перейти от уровня картографирования масштаба 1: 200 000 к составлению планов на ключевые участки масштаба 1: 20 000. Комплексирование космических снимков разного функционального масштаба обеспечило увеличение закартированных геологических объектов (например, даек) на порядок. Детальное картографирование территории позволило вплотную подойти к геоинформационному моделированию геологических структурных элементов — прогнозных индикаторов.

**Ключевые слова:** снимки высокого и среднего пространственного разрешения, геологическое картографирование, дистанционное зондирование, ГИС

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019559-71>

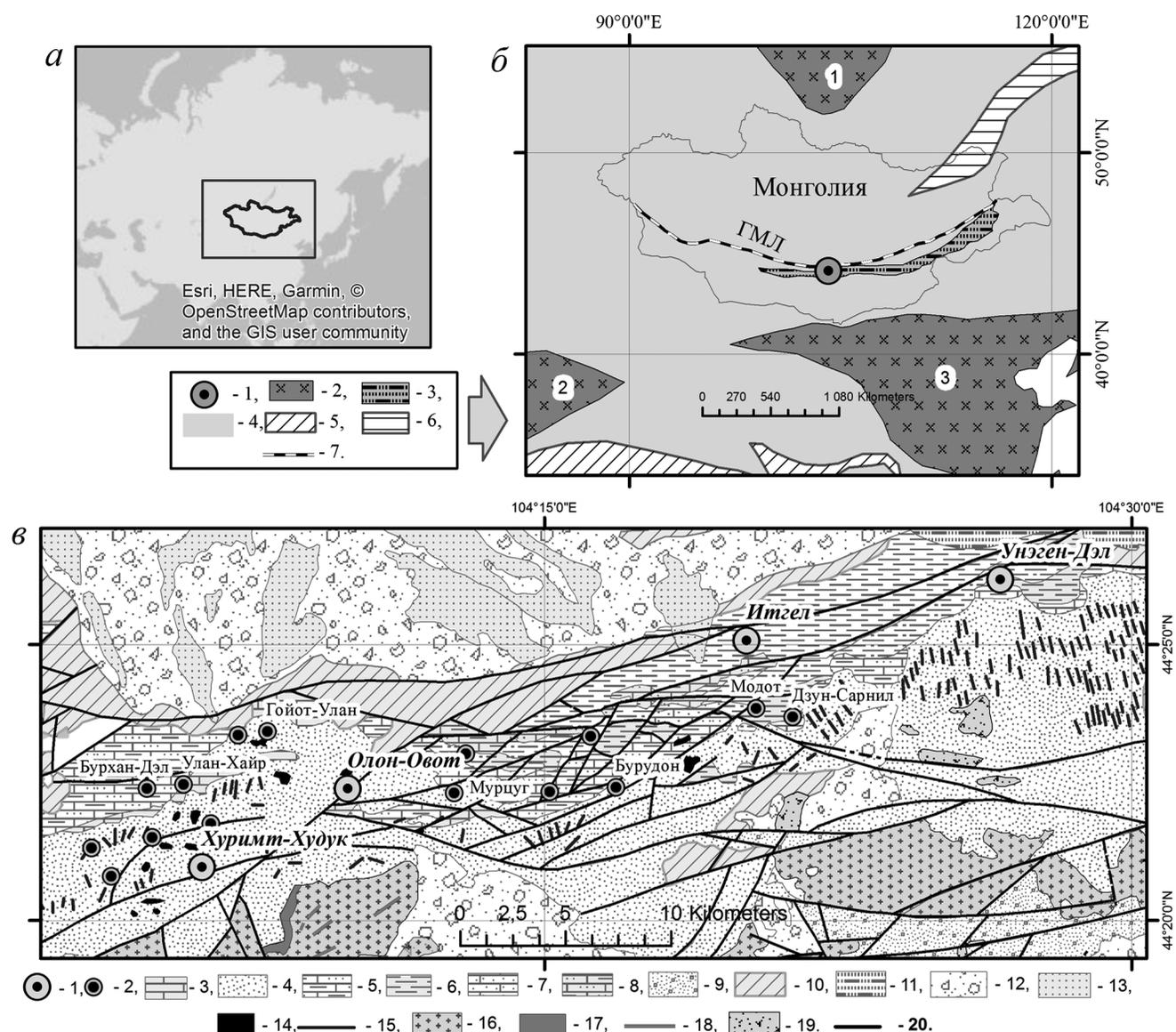
#### ВВЕДЕНИЕ

Олон-Овоотский золоторудный узел находится на территории Монголии (рис. 1а) в Центрально-Азиатском орогенном поясе, к северу от которого расположен докембрийский сибирский кратон, а к югу таримский и китайско-корейский кратоны, внутри Мандалобинского террейна (рис. 1б).

Традиционно (Амантов и др., 1970; Маринов и др., 1973) территория Монголии подразделяется на северный «каледонский» ороген и южный «герцинский» или «варисканский» ороген. Региональной, топографической и структурной границей разделяющей эти орогены, является так называемый «Главный Монгольский Линеамент» (рис. 1б). Непосредственно Олон-Овоотский рудный узел приурочен к Мандалобинскому террейну, который примыкает к Главному Монгольскому Линеаменту с юга и представляет

собой вытянутый пояс, состоящий из пород с возрастом от ордовика до мела (Badarch et al., 2002; Ярмолюк и др., 2008; Козаков и др., 2011). Олон-Овоотский золоторудный узел приурочен к Мандалобинской надвиговой зоне, которая выражена системой разломов (рис. 1в) (Chuluun et al., 1993; Bayarjargal, 2017). В 1999–2000 годах в результате проведенных совместно с компанией «Монгол Газар» поисково-разведочных работ были обнаружены наиболее крупные объекты Олон-Овоотского рудного узла (Борисенко и др., 2002). Олон-Овоотский рудный узел находится на площади листа L-48-XXXIII (Заботкин и др., 1983). В период с 2003 по 2010 год разработкой месторождения занимались монгольские и китайские компании. С 2011 г. основной карьер месторождения Олон-Овоот законсервирован. За все время работы рудника на месторождении добыто около 10 тонн золота (Bayarjargal et al., 2014). Восстановление работы рудника

«Олон-Овоот» является важной для Монголии государственной задачей. На сегодняшний день рудные объекты нуждаются в ревизии и дополнительной разведке. По нашим оценкам, запасы Олон-Овоотского рудного узла могут достигать 100 тонн золота.



**Рис. 1.** *а* – территория исследований; *б* – расположение Мандалобинского террейна в структурах Центрально-Азиатского складчатого пояса. (Safonova, Santosh 2014); Условные обозначения: 1 – Олон-Овоотский рудный узел, 2 – кратоны (1 – Сибирский, 2 – Таримский, 3 – Северо-Корейский), 3 – Мандалобинский террейн, 4 – Центрально-Азиатский складчатый пояс, 5 – складчатый пояс Палеотетиса, 6 – Монголо-Охотский (Палео-Тихоокеанский) складчатый пояс, 7 – Главный Монгольский Линеамент (ГМЛ); *в* – геологическое строение Олон-Овоотского рудного узла: 1 – месторождения, 2 – рудопоявления, 3 – нижнесилурийские известняки, 4 – ниже-среднесилурийские песчаники, глинистые сланцы, известняки, 5 – раннедевонские глинистые и известково-глинистые сланцы, известняки, 6 – среднедевонские песчаники, алевропесчаники, алевролиты, туфы кислого состава, 7 – позднедевонские песчаники, алевропесчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты, 8 – раннекаменноугольные известняки, 9 – средне-позднеюрские пестроцветные, красноцветные и зеленоцветные конгломераты, песчаники, глины, гравелиты, суглинки, аргиллиты, 10 – позднеюрские щелочные вулканиты, 11 – раннемеловые красноцветные, редко зеленоцветные валунники, щебни, валунные щебнистые суглинки, глины, 12 – плиоценовые-нижнечетвертичные щебни, песчаники, гравелиты, супеси, суглинки, глины с конкрециями мергелей, валунники, 13 – четвертичные отложения, 14 – среднедевонские диабазы, габбро-диабазы (тела), 15 – раннедевонские диабазы, габбро-диабазы (дайки), 16 – раннепермские граниты биотитовые, амфибол-биотитовые равномернзернистые, порфиривидные, 17 – раннепермские граниты лейкократовые равномернзернистые, порфиривидные, пегматоидные, 18 – раннепермские кварцевые диориты, 19 – позднеюрские трахилапарито-дациты, 20 – разломы.

Проведение дополнительных объемов геолого-съемочных работ традиционными методами на территории южной Монголии является затратным мероприятием. Возможности методов дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), включая космоснимки не только среднего, но и высокого пространственного разрешения позволяют существенно детализировать масштаб геологической карты от 1: 200 000 до 1: 20 000. Картографические материалы, полученные при дешифрировании ДДЗЗ могут быть основой для постановки более детальных геофизических методов исследования перспективных площадей, а также для планирования разведочных горных выработок. Предлагаемая статья посвящена обобщению результатов дешифрирования ДДЗЗ при решении задач детального геологического картирования на территории Олон-Овоотского рудного узла.

#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для решения поставленных задач использовались космические снимки датчика Sentinel. В программном продукте SNAP (Sentinel Application Platform) проводилась предварительная обработка — с уровня L1C до уровня L2A (модуль Sen2Cor): радиометрическая коррекция,

поправка за рельеф. В качестве цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались бесплатные данные ALOS (японского агентства аэрокосмических исследований) свободного доступа компании NTT DATA и RESTEC (пространственное разрешение —  $0.000278^\circ$ , что для широты исследования составляет 30 м). ЦМР построена на основе сочетания обработки радарных (спутника ALOS-2) данных и архивных стереопар, полученных оптическим сенсором ALOS PRISM. Его особенность состоит в том, что сенсор ведет съемку сразу тремя камерами, что позволяет получать «триплеты» — три кадра (надир, под углом назад и вперед). Как итог — ЦМР ALOS представляет из себя DSM (цифровая модель местности) и ее нужно с осторожностью использовать для лесных территорий. Поскольку исследуемая территория Монголии находится в зоне полупустынь и характеризуется практически полным отсутствием растительности, то применение цифровой модели местности ALOS фактически представляет собой ЦМР. На рис. 2 а, б представлены фрагменты космического снимка Sentinel-2 до и после обработки модулем Sen2Cor. На рисунке видно, что участки с тенями стали более светлыми, но тени еще остались за счет того, что используемое пространственное разрешение ЦМР менее детальное, чем космоснимка.

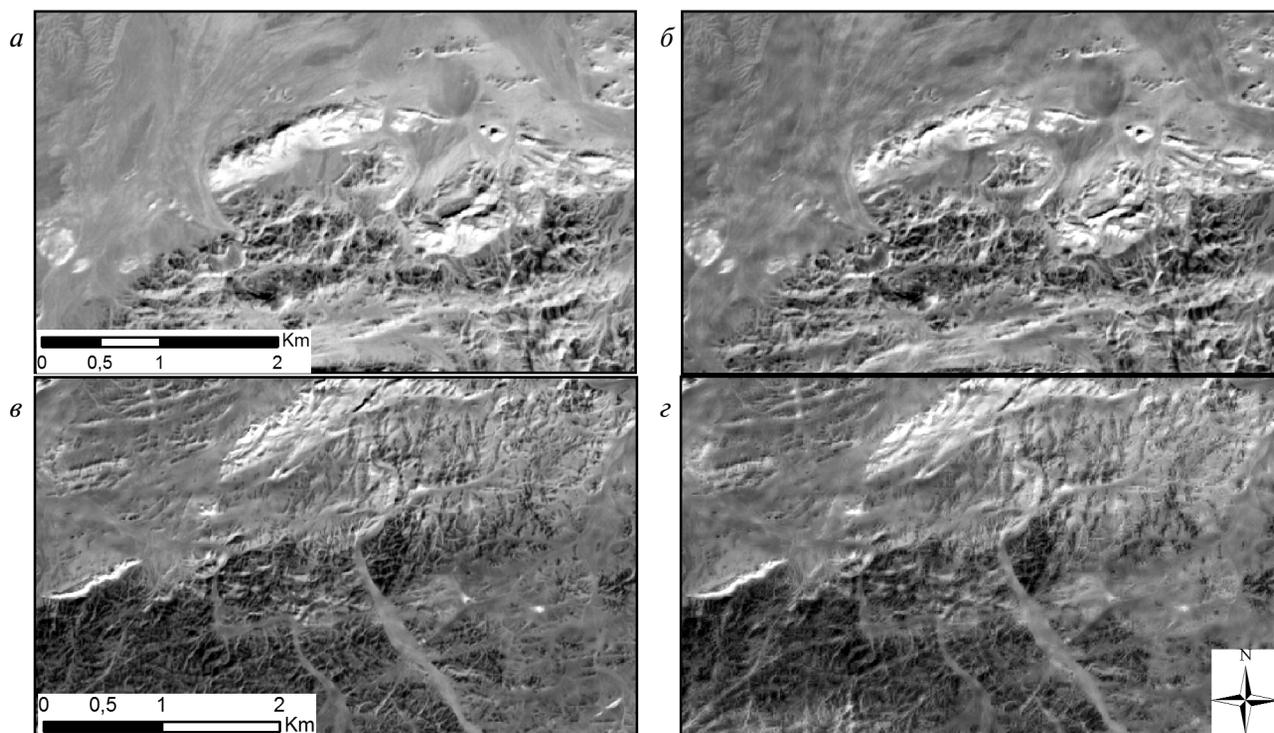


Рис. 2. Примеры обработки снимка Sentinel-2: а — фрагмент исходного снимка; б — фрагмент снимка после радиометрической коррекции и поправки за рельеф; в — фрагмент снимка с исходным разрешением 10 м; г — фрагмент снимка с разрешением 10 м (исходное разрешение 20 м).

Кроме орторектификации, проводилось улучшение пространственного разрешения (в модуле Sentinel2 Super Resolution программного продукта SNAP): каналы с исходным разрешением 20 и 60 м переведены в 10 м. На рис. 2в снимок с исходным разрешением 10 м, на рис. 2г снимок с разрешением 10 м (переведен из 20 м). Для верификации структурно-морфологического дешифрирования по снимкам Sentinel использовались космические снимки высокого разрешения, полученные из Google Планета Земля (Google Earth).

Работа проводилась в программных пакетах ENVI 5.2, ArcGis 10.2.0, Statistica 10. В работе использовались различные методики, широко применяемые при обработке данных дистанционного зондирования (ДДЗ): визуальное дешифрирование, построение индексных изображений, классификации с обучением, построение буферных зон и пр.

Построение индексных изображений давно используется в цифровой обработке данных дистанционного зондирования Земли. Для его получения значения яркости каждого пикселя вычисляются путем применения арифметических операций над значениями яркости этого пикселя из разных каналов. Так, существует более двух сотен вегетационных индексов. В геологии такие методы тоже получили применение. Известно (<https://www.indexdatabase.de>), что для различных данных ДЗ разработано около 40 геологических индексов. В работе строились разные индексные изображения и проверялись на оптимальный результат для поставленных задач. В конечном итоге выбор остановился на двух видах индексов, рассчитанных по данным Sentinel-2: 1) индекс гидроксида железа; 2) индекс силиката железа. Приведем их характеристику.

1) индекс гидроксида железа (Eisenhydroxid Index), еще называемый простое отношение диапазонов среднего ИК к красному:

$$Eissen = \frac{DN(1400 \div 3000)}{DN(640 \div 760)},$$

где  $DN(1400 \div 3000)$  — значения в средней инфракрасной (ИК) части спектра,

$DN(640 \div 760)$  — значения в красном диапазоне.

2) Индекс силиката железа (Ferrous Silicates) имеет формулу:

$$FS = \frac{DN(2154 \div 2185)}{DN(1600 \div 1700)},$$

где  $DN(2154 \div 2185)$  — это значение спектральных яркостей в средней инфракрасной (ИК) части спектра, в электромагнитном диапазоне от 2145 до 2185 нм,

$DN(1600 \div 1700)$  — значения в средней инфракрасной (ИК) части спектра.

Индекс FS был разработан для определения местоположения силиката железа по многозональным снимкам ASTER ([https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER\\_Processing\\_for\\_Mineral\\_Exploration.pdf](https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf)).

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

Наиболее древними осадочными образованиями являются ниже-силурийские известняки (номер 3 на рис. 1б) и ниже-среднесилурийские терригенные породы (номер 4 на рис. 1б), которые сформировались в условиях пассивной континентальной окраины. Стратиграфически выше залегают терригенные породы раннего девона (номер 5 на рис. 1б), которые образовывались уже в обстановках активной континентальной окраины. К среднему девону относится формирование даек и мелких гипабиссальных тел габбро-диабазов (номера 14, 15 на рис. 1б). На протяжении среднего и позднего девона в условиях активной континентальной окраины продолжалось осадконакопление известняков, подушечных базальтов, андезитов и их туфов, вулканогенно-терригенных пород (номера 6, 7 на рис. 1б). Каменноугольная система представлена известняками (номер 8 на рис. 1б), которые формировались в условиях пассивной континентальной окраины. Для перми в пределах региона отмечается развитие вулканитов и осадочных пород, которые не встречаются на территории исследования (рис. 1б).

Интрузивными породами, имеющими наибольшее распространение в рамках района исследования, являются гранитоиды мандалобинского комплекса, возраст которых определен как раннепермский (возможно позднедевонский). К ранней фазе этого комплекса относятся низкощелочные граниты амфибол-биотитовые равномернозернистые, порфиroidные (номер 16 рис. 1б). Более поздняя фаза представлена лейкократовыми порфиroidными, иногда пегматоидными гранитами (номер 17 рис. 1б). Дайки этого комплекса представлены раннепермскими аплитами, липаритами, пегматитами и кварцевыми диоритами.

Породы триаса на изучаемой территории отсутствуют, а для юрского периода характерны пестроцветные терригенные и эффузивные породы, которые формировались в континентальных условиях (номера 9, 10 рис. 1б). Меловой период представлен красноцветными валунисто-щебнистыми отложениями (номер 11 рис. 1б). Неоген-четвертичные отложения имеют ограниченное

распространение на изучаемой территории (номера 12, 13 рис. 1б).

С раннепермским гранитоидным массивом и последующим дайковым комплексом генетически связана гидротермально-метасоматическая золотоносная минерализация Олон-Овоотского рудного узла. Олон-Овоотский рудный узел представлен серией месторождений и рудопроявлений. Наиболее крупные из них: Олон-Овоот, Хуримт-Худук, Итгел и Унаген-Дэл.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОЛОН-ОВООТСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Олон-Овоотский рудный узел является крупным многостадийным объектом, на котором проявились разновозрастные стадии формирования гидротермально-метасоматической (Au-Te-Cu-As-Sb-Hg) минерализации (Борисенко и др., 2002; Sarantuya et al., 2017). Наиболее ранняя и высокотемпературная (до 450 °С) стадия проявлена на нижних горизонтах месторождения Олон-Овоот и вскрыта карьером. Эта стадия представлена турмалин-доломитовыми метасоматитами. На данном этапе изучения, золотоносность этой стадии не установлена.

Следующая стадия минералообразования (до 350 °С) представлена золотоносными березитами, которые развиваются по среднедевонским габбро-диабазам. Рудные минералы этой стадии — борнит, халькопирит, пирит, алтаит, золото, галенит. Жильные минералы — кварц, доломит, кальцит, серицит, хлорит. Свежие золотоносные березиты — оливково-зеленые, пронизаны кварц-карбонатными жилами. Кроме месторождения Олон-Овоот, на котором вскрыты залежи золотоносных березитов, эта стадия проявлена на участках Гойон-Ула, Мурцуг и Бурудон. Возраст этой стадии, установленный Ag-Ag методом по серициту из кварцевой жилы, составляет 298±3 млн. лет.

Следующая стадия (до 280 °С) представлена кварцевыми жилами с золотом и арсенопиритсодержащими березитами, которые развиваются по нижнесилурийским терригенным породам. Рудные минералы: галенит, халькопирит, арсенопирит, золото, медь, алтаит, нагиагит, колорадоит, гринокит. Жильные минералы: кварц, доломит, серицит. Эта стадия проявлена на месторождении Хуримт-Худук. Возраст этой стадии, установленный Ag-Ag методом по серициту из кварцевой жилы, составляет 289±3 млн. лет. Наиболее низкотемпературная (до 180 °С)

стадия гидротермального минералообразования проявлена на участках Унэгэн-Дэл и Итгел. Здесь кварцевые жилы с антимонитом, пиритом, киноварью и ртутистым золотом пронизывают девонские известняки, образуя золотоносные кварциты. Возраст этой стадии, установленный Ag-Ag методом по серициту из кварцевой жилы, составляет 279±3 млн. лет. Аналитические работы по определению абсолютного возраста были выполнены в центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

На всех рудопроявлениях и месторождениях развита зона окисления. Разрушение золотосодержащих теллуридов и золотосодержащего пирита приводит к обогащению золотом приповерхностных частей месторождений. Выветрелые березиты на карьере Олон-Овоот имеют характерный вишневый цвет, обеспеченный продуктами окисления сульфидов. Арсенопиритсодержащие березиты месторождения Хуримт-Худук в зоне окисления имеют яркую охристую окраску.

Таким образом, общие закономерности рудоносности на территории Олон-Овоотского рудного узла в достаточной мере определены. Перспективными на золото являются участки развития кварц-карбонатных жил и метасоматические залежи. Вместе с тем, существующих геологических карт масштаба 1: 200 000 явно недостаточно для оптимизации разведочных работ. Необходимы являются более детальные карты и схемы, для создания которых нами использовалось дешифрирование ДДЗЗ.

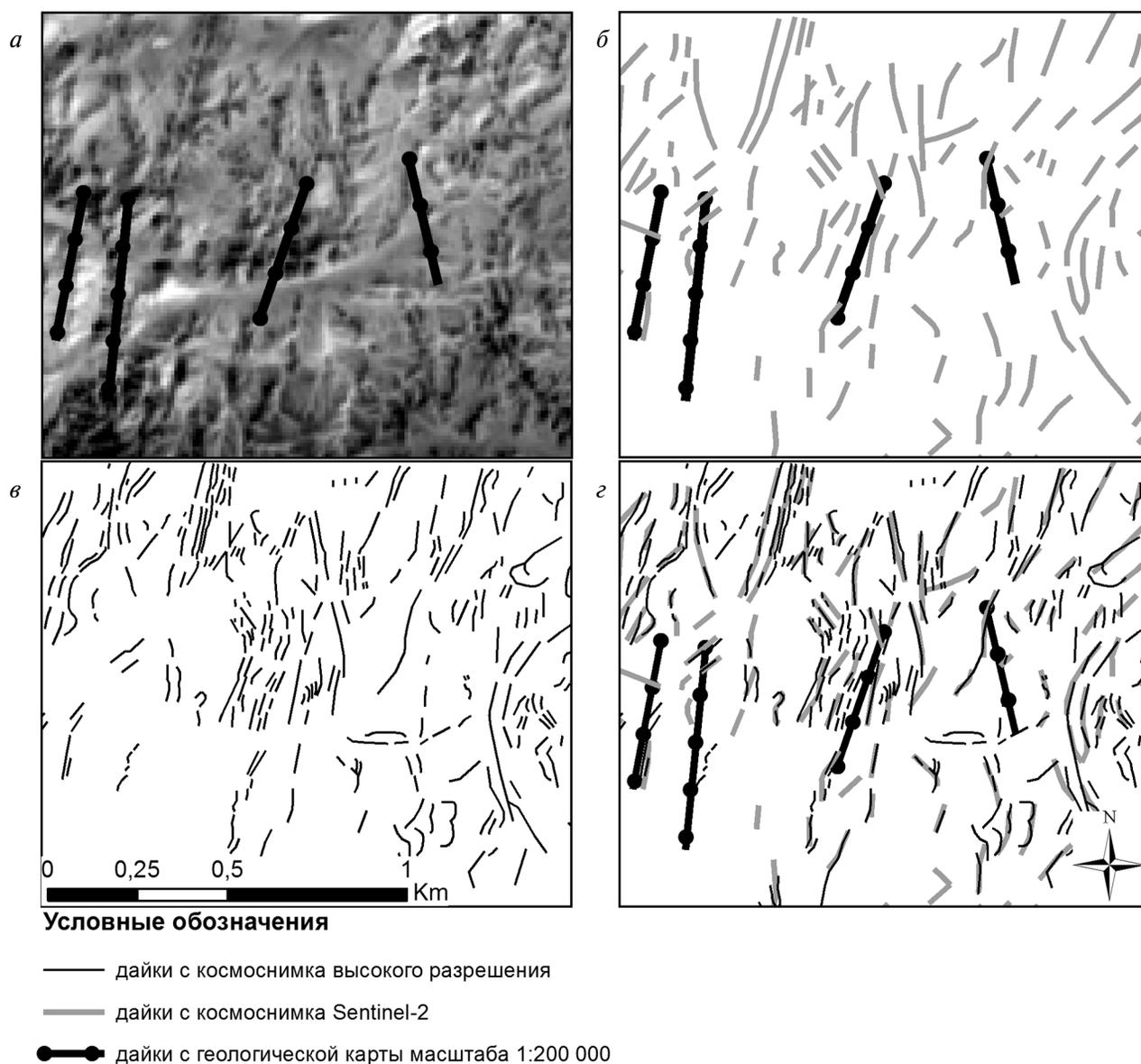
#### ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ РАЗНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

При создании детальных геологических карт и схем Олон-Овоотского рудного узла масштаба 1: 20 000 проводилось выделение большого количества разнородных геологических объектов. Их границы выделялись по космическим снимкам среднего (Sentinel-2) и детального (из сервиса Google Earth) пространственного разрешения. Результативность дешифрирования космоснимков разного пространственного разрешения существенно различается. Так, на основе визуального дешифрирования по снимкам Sentinel-2 были оцифрованы дайки. Полученный вектор сравнивался с геологической картой 1: 200 000 масштаба. На рис. 3а представлен фрагмент снимка среднего пространственного разрешения с наложением даек с геологической карты.

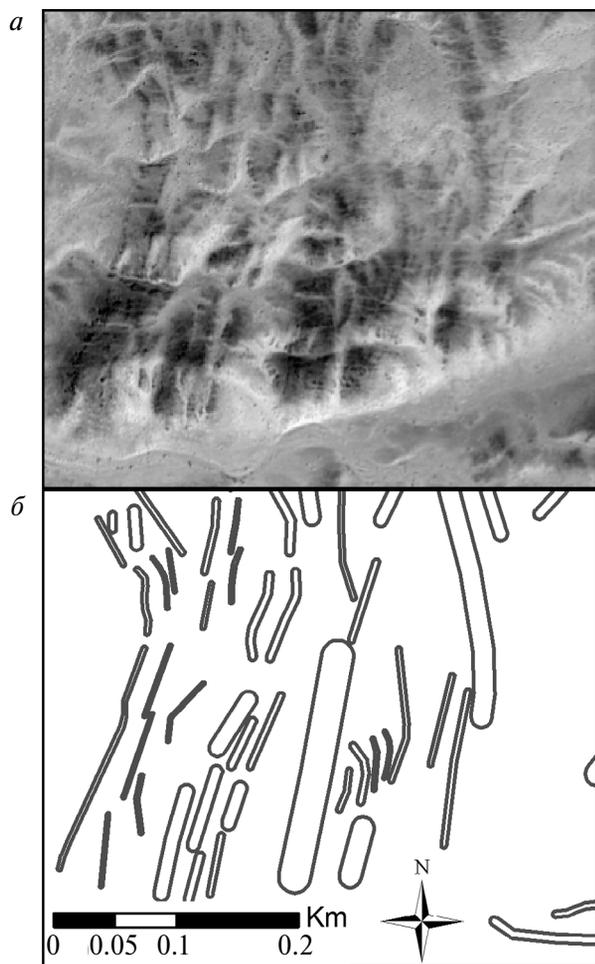
На рис. 3б серым тоном отображаются дайки, дешифрованные по космоснимку Sentinel-2. Как видно из рисунка, реальное положение даек со снимка не совпадает с данными карты. Количество даек на космоснимке Sentinel-2 в 26 раз больше (107) по сравнению с дайками, выделенными на карте (4). Космический снимок высокого разрешения с результатом оцифровки даек приведен на рис. 3в. За счет того, что снимок имеет пространственное разрешение 2.4 м, на представленном фрагменте было распознано 276 даек, что почти в 70 раз больше, чем на геологической карте и в 2.5 раза больше, чем на снимке Sentinel-2.

На рис. 3г представлено сравнение даек с геологической карты, космоснимков среднего и высокого пространственного разрешения. Из рисунка видно, что даже общедоступные снимки среднего пространственного разрешения являются более информативными и детальными, чем геологические карты такого же масштабного ряда.

Кроме этого, снимок высокого разрешения позволил снизить трудоемкость оцифровки толщины даек. При визуальном дешифрировании не только отрисовывались оси даек в векторном слое, но и замерялась их толщина. Эта информация заносилась в атрибутивную таблицу, что позволило



**Рис. 3.** Дешифрирование даек на снимках разного пространственного разрешения; *а* — дайки с геологической карты масштаба 1: 200 000; *б* — сравнение даек, полученных с космоснимка Sentinel-2 и геологической карты; *в* — дайки, выделенные по космоснимку высокого пространственного разрешения; *г* — сравнение даек с геологической карты масштаба 1: 200 000 и даек с космоснимков разного пространственного разрешения.



**Рис. 4.** Детальное дешифрирование даек; *a* — космоснимок высокого пространственного разрешения; *б* — картирование толщины даек.

в дальнейшем построить буферные зоны вокруг осей даек (рис. 4) и наглядно показать их толщину.

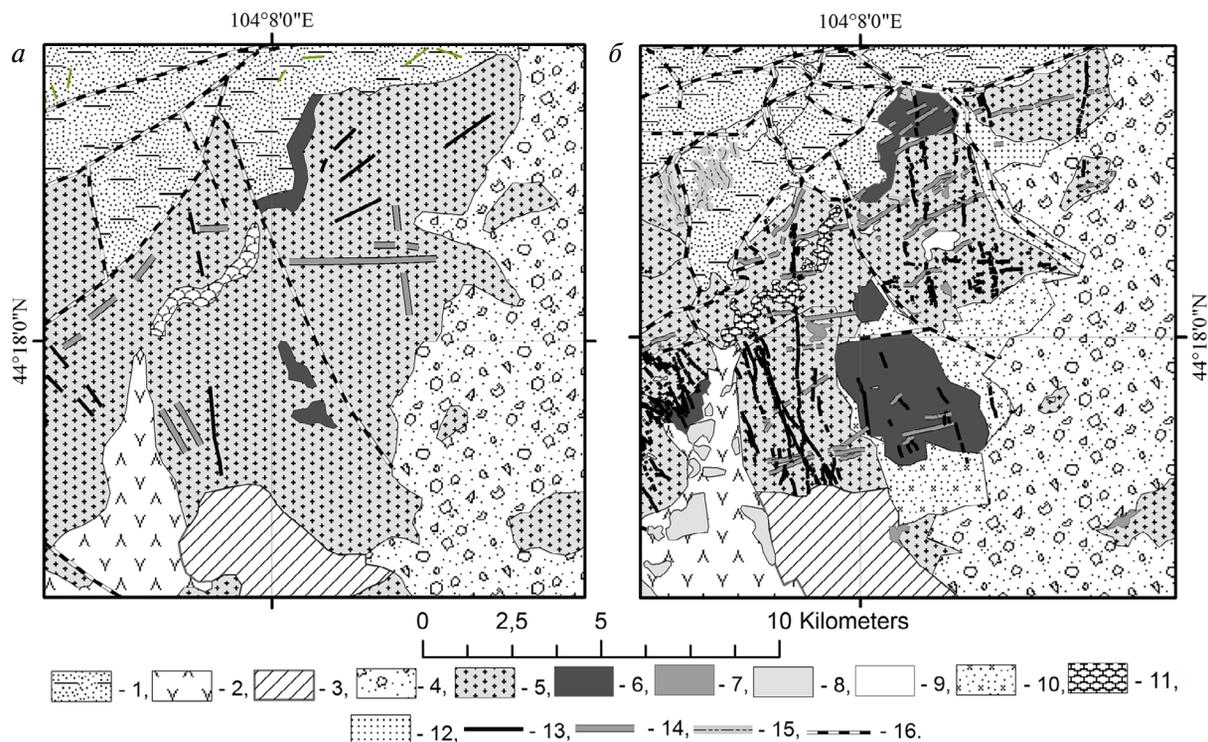
На рис. 5*a* отображен фрагмент геологической карты масштаба 1: 200 000. На рис. 5*б* показана та же территория с уточненными границами на основе анализа ДДЗЗ. Удалось уточнить внутреннее строение Мандалобинского гранитоидного массива. Определены характерные признаки разных фаз массива: первая фаза массива, представленная биотитовыми, амфибол-биотитовыми равномернозернистыми, порфиоровидными гранитами, имеет ровную выветрелую поверхность; вторая фаза представлена лейкократовыми гранитами равномернозернистыми, порфиоровидными, местами — пегматоидными; для них характерен мелко-сочный, с острыми вершинами, рельеф и более светлый (по сравнению с породами первой фазы) оттенок выветрелой поверхности. Зафиксирована в 8 раз большая площадь выхода на дневную поверхность пород второй фазы Мандалобинского

массива (с 2.47 до 20.7 км<sup>2</sup>) по сравнению с данными геологической съемки. Существенно уточнены очертания, расположенного в центральной части рис. 5 фрагмента кровли Мандалобинского массива, который представлен ороговикованными терригенными породами.

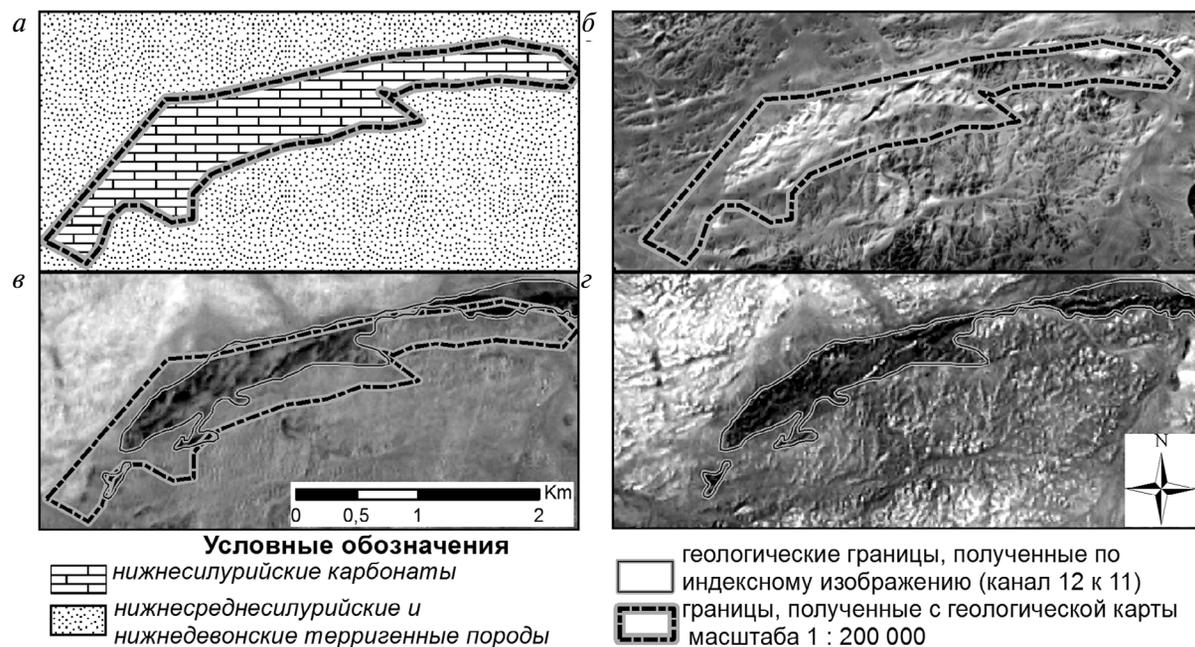
Дайковый комплекс, сопровождающий Мандалобинский гранитный массив, представлен тремя петрографическими разностями нижнепермских даек. 1) Кварцевые диориты имеют преимущественно субмеридиональное простирание. 2) Липариты имеют субширотное простирание. 3) Аплиты пространственно приурочены ко второй фазе Мандалобинского массива. Общее количество даек после дешифрирования (рис. 5) увеличилось в 15.5 раз (с 51 до 792). Зафиксированы нижнепермские дайки кварцевых диоритов в нижне-среднесилурийских отложениях, которые представлены олигомиктовыми песчаниками, алевропесчаниками, глинистыми сланцами, известняками, реже конгломератами. Выделены новые объекты, которых нет на карте двухсоттысячного масштаба. Это приконтактные ореолы Мандалобинского гранитоидного массива, а также метасоматические образования, различимые на снимках высокого пространственного разрешения. Точное определение химического состава и генезиса этих объектов невозможно без проведения дополнительного объема полевых работ, однако картографирование таких объектов имеет смысл для выявления участков, перспективных на оруденение. Добавлены участки распространения четвертичных отложений. Также, выявлены зоны локализации кварцевых жил. Жилы отличаются от даек меньшей толщиной, более сложной морфологией; образуют крючковатые, зигзагообразные объекты.

Карбонатные породы зачастую выступают в роли геохимического барьера для рудоносных гидротермальных растворов, поэтому уточнение границ этих пород позволяет оптимизировать разведочные работы. По снимкам среднего пространственного разрешения проводилось уточнение границ выхода на земную поверхность нижнесилурийских известняков внутри области распространения нижне-среднесилурийских и нижнедевонских терригенных пород. На космоснимок Sentinel-2 (рис. 6*б*) наложены границы свит с фрагмента геологической карты (рис. 6*a*). Видно, что контуры карбонатного тела не совпадают с зафиксированными на геологической карте контурами нижнесилурийских известняков.

Для более четкого выделения карбонатных пород по снимкам Sentinel-2 были построены индексные изображения. Так, на изображении, представляющим собой индекс силиката железа (отношение



**Рис. 5.** Цифрами на карте обозначены 1 — нижне-среднесилюрийские песчаники, глинистые сланцы, известняки; 2 — позднеюрские щелочные вулканы; 3 — средне-позднеюрские пестроцветные, красноцветные и зеленоцветные конгломераты, песчаники, глины, гравелиты, суглинки, аргиллиты; 4 — раннемеловые красноцветные, редко зеленоцветные валунники, щебни, валунные щебнистые суглинки, глины; 5 — пграниты амфибол-биотитовые порфиоровидные; 6 — раннепермские граниты лейкократовые равномернoзернистые, порфиоровидные, пегматоидные; 7 — глинистые образования красновато-оранжевого цвета; 8 — глинистые образования голубовато-сизого цвета; 9 — глинистые образования белесого цвета; 10 — экзоконтактовые зоны Мандалобинского массива; 11 — ороговикованные нижне-среднесилюрийские терригенные породы; 12 — четвертичные отложения; 13 — нижнепермские кварцевые диориты (дайки); 14 — нижнепермские липариты (дайки); 15 — нижнепермские аплиты (дайки); 16 — разломы.



**Рис. 6.** Детализация геологических границ; *a* — фрагмент геологической карты масштаба 1 : 200 000; *б* — фрагмент снимка Sentinel-2; *в* — индексное изображение, построенное путем отношения каналов 12 к 11 снимка Sentinel-2; *г* — индексное изображение, построенное путем отношения каналов 12 : 5 снимка Sentinel-2.

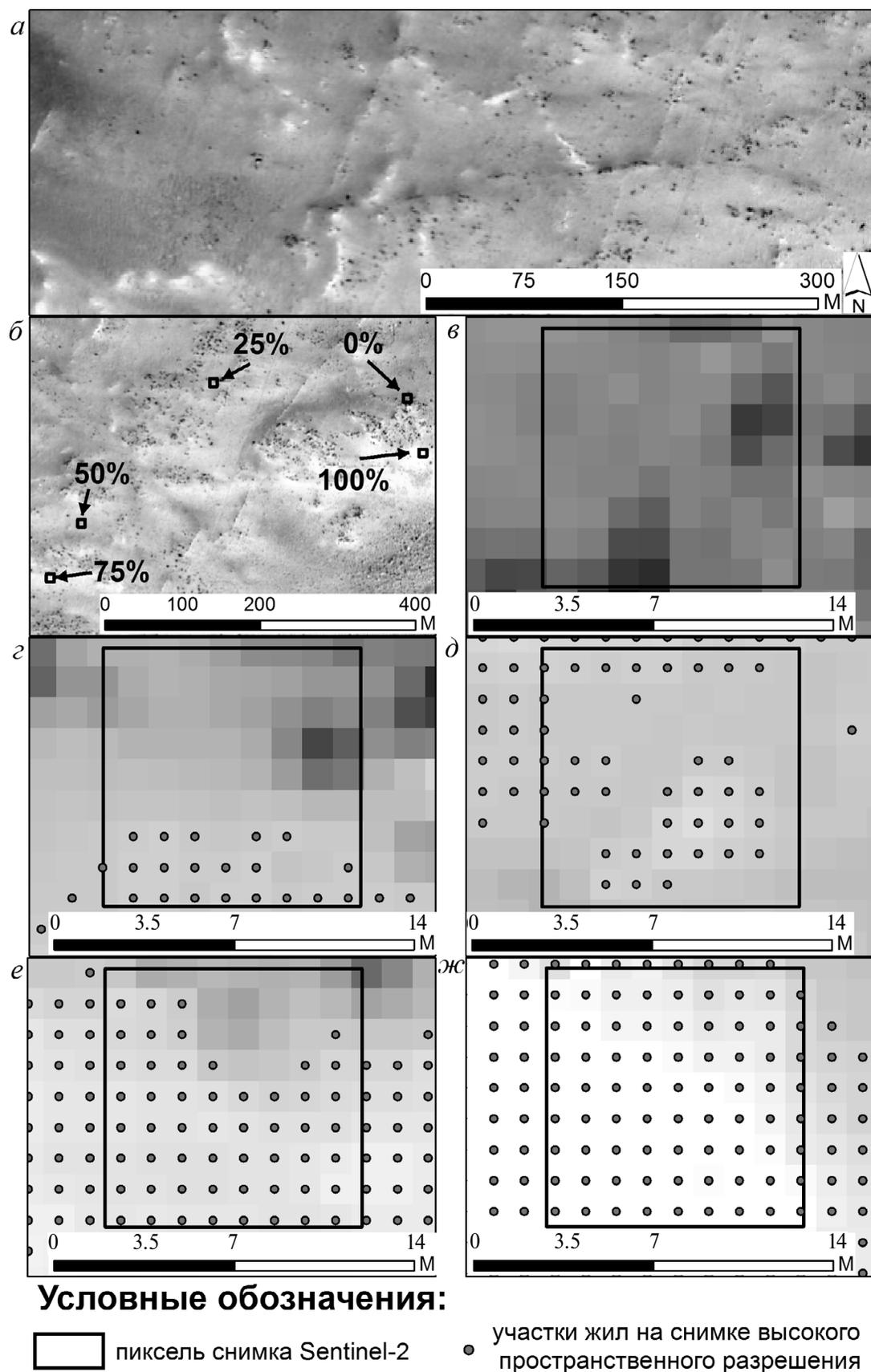


Рис. 7. Субпиксельный анализ космоснимка Sentinel-2.

каналов 12 и 11, рис. 6в), карбонатам соответствуют пониженные яркостные характеристики, а повышенные яркостные характеристики отражают породы, имеющие преимущественно терригенный состав. На изображении, где показан индекс гидроксида железа (рис. 6г), пониженные яркостные характеристики, соответствующие карбонатам показаны еще более контрастно.

На представленном фрагменте сумма площадей нижнесилурийских известняков, выделенных по космическому снимку Sentinel-2, составляет 2.55 км<sup>2</sup>. Если принять эту цифру за 100%, то лишь 31% (0.793 км<sup>2</sup>) подтвердилось индексным изображением, а 16.07% (0.41 км<sup>2</sup>) не отражено на карте. Также 52.55% (1.34 км<sup>2</sup>) геологических границ карбонатов с карты не нашло своего отражения на космических снимках. На индексных изображениях геологические границы видны более отчетливо, что позволяет уточнять и исправлять геологическое строение территории.

Одним из важнейших рудоконтролирующих факторов являются кварц-карбонатные гидротермальные жилы. На снимке Sentinel-2 они не выделяются как геологические тела, имеющие четкие границы, т.к. их размеры (толщина и протяженность) еще меньше, чем у даек. Таким образом, для снимков среднего пространственного разрешения жилы являются объектами субпиксельного уровня.

Однако они выделяются визуально на снимках высокого разрешения (рис. 7а) и на гистограммах, отражающих яркостные характеристики, легко отделяются от вмещающих пород по перепаду значений. По порогу перепада значений на снимке высокого пространственного разрешения были выделены пиксели, относящиеся к кварцевым жилам. Затем было проанализировано, как жилы проявляются в субпиксельной структуре снимков среднего разрешения. В каждом пикселе снимка Sentinel-2 (10 × 10 м) содержится примерно 64 пикселя снимка высокого разрешения (1.2 × 1.2 м). Для каждого пикселя Sentinel-2 было посчитано количество входящих в него пикселей с размером 1.2 × 1.2 м по яркостным характеристикам, соответствующих жилам. После этого стало возможным сопоставить яркостные характеристики пикселей Sentinel-2 с удельным содержанием жил в этих пикселях. Для наглядности были отобраны пиксели Sentinel-2, содержащие 0%, 25%, 50%, 75% и 100% кварцевых жил (рис. 7в, г, д, е, ж). В качестве иллюстрирующего полигона выбран фрагмент космоснимка Sentinel-2, который охватывает интрузию гранитоидного состава и ее эндоконтактовую часть (рис. 7б).

Как и предполагалось, наблюдается увеличение отражательной способности спектров снимка Sentinel-2 по мере увеличения процентного содержания жил (рис. 8). Наибольшие отличия



Рис. 8. Спектральные кривые пикселей Sentinel-2 с разным содержанием кварцевых жил.

наблюдаются в ближнем ИК-диапазоне (от 705 нм до 840 нм). Поскольку изучаемая территория характеризуется практически полным отсутствием растительного покрова, то можно с уверенностью сказать, что растительность не вносит значительные искажения в характеристику отраженного сигнала (известно, что растительность в ближнем-ИК диапазоне имеет максимум отражения). На рис. 8 видно, что основной разрыв значений в ближнем ИК-диапазоне находится между пикселями с содержанием жил 50% и 75%. Это соответствует примерному порогу 0.36 (36%), который можно использовать для выделения пикселей Sentinel-2 с значительным содержанием карбонат-кварцевых жил, перспективных на рудоносность. Отметим лишь, что этот поисковый признак не будет работать в областях распространения известняков, которые, впрочем, не очень широко развиты в районе исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дешифрирование космоснимков среднего и высокого пространственного разрешения позволило существенно уточнить геологическое строение территории и перейти от уровня картографирования масштаба 1: 200 000 к составлению планов на ключевые участки масштаба 1: 20 000. Для выделения площадных геологических объектов достаточно эффективными оказались индексы гидроксида железа и силиката железа на снимках Sentinel-2. Выделение линейных объектов на снимках высокого разрешения и их сгущений на снимках среднего разрешения позволило выявить и зафиксировать геологические объекты, являющиеся прямыми или косвенными индикаторами золотого оруденения. Особо подчеркнем, что для структурно-морфологического дешифрирования с выделением линейных элементов оказалось не обязательным исследование спектрального домена на снимках высокого разрешения. Вполне достаточно для такого вида дешифрирования RGB-композиции с информационного ресурса Google Earth. Детальное картографирование территории позволило вплотную подойти к геоинформационному моделированию геологических структурных элементов — прогнозных индикаторов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи считают своим долгом выразить благодарность Google Earth за бесплатные космические снимки высокого разрешения, использованные в некоммерческих научных

исследованиях, представленных в этой статье. Кроме того, авторы благодарят к.г.-м.н. Наумова Евгения Анатольевича и к.г.-м.н. Добрецова Николая Николаевича за консультацию и помощь при выполнении работы.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН. Финансирующая организация: “Министерство науки и высшего образования Российской Федерации”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амантов В.А., Благодоров В.А., Борзаковский Ю.А., Дуранте М.В., Зонешайн Л.П., Лувсанданзан Б., Матросов П.С., Суетенко О.Д., Филиппова И.Б., Хасин Р.А.* Основные черты стратиграфии палеозоя Монгольской Народной Республики // Стратиграфия и тектоника Монгольской Народной Республики. Труды совместной Советско-Монгольской геологической экспедиции. Вып. 1. М.: Наука, 1970. С. 8–63.
- Борисенко А.С., Ганбат Ц., Акимцев В.А.* Отчет по контракту 1472/14–2002 ОИГГМ СО РАН-компания «Монгол Газар». Ч. 2. Южно-Гобийский золоторудный пояс. 2002.
- Заботкин Л.В., Баатар Ц., Быховер В.Н., Вертлиб В.И., Ган-Очир Ж., Добров Г.М., Лопатин В.М., Мосиондз К.А., Никитин Л.В., Цэдэнбал Ч.* Лист геологической карты L-48-XXXIII, Масштаб 1: 200 000. М.: Всесоюзное экспортно-импортное объединение «Техноэкспорт», 1983.
- Козаков И.К., Диденко А.Н., Азимов П.Я., Кирнозова Т.И., Сальникова Е.Б., Анисимова И.В., Эрдэнэжаргал Ч.* Геодинамические обстановки и условия формирования кристаллических комплексов Южно-Алтайского и Южно-Гобийского метаморфических поясов // Геотектоника. 2011. № 3. С. 7–30.
- Маринов Н.А., Зонешайн Л.П., Благодоров В.А.* Геология Монгольской Народной Республики. Т. 2. // Магматизм, метаморфизм, тектоника. М.: Недра, 1973. С. 782.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Козловский А.М., Котов А.Б., Лебедев В.И.* Геохронология магматических пород и специфика формирования позднепалеозойской Южно-Монгольской активной окраины Сибирского континента // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2008. Т. 16. № 2. С. 59–80.
- ASTER Mineral Exploration [Electronic resource]. Mode of access: [https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER\\_Processing\\_for\\_Mineral\\_Exploration.pdf](https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf)
- Badarch G., Cunningham W.D., Windley B.F.* A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia // Journal of Asian Earth Sciences. 2002. V. 21. № 1. P. 87–110.

*Bayarjargal B.* The Olon Ovoot Gold-Mineralizing Self-Organized Critical System, Southern Mongolia. California State University, Long Beach, 2017.

*Bayarjargal B., Kelty T., Tseveendorj B., Gankhuu G.* The Olon Ovoot orogenic gold deposit, Southern Mongolia: structural and stable isotope constraints. In 2014 GSA Annual Meeting in Vancouver, British Columbia, October, 2014.

*Chuluun B., Davkharbayar D., Nyamaa B., Washama S.* Report on detailed prospecting and mineral prediction work carried out on Olon Ovoot gold mineralization area. Mongolian. Geological Information Center Open File Report (4780), 1993.

Index DataBase — A database for remote sensing indices [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.indexdatabase.de>

*Safonova I.Y., Santosh M.* Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Research*. 2014. V. 25. № 1. P. 126–158.

*Sarantuya O., Nakanishi T., Yonezu K., Tindell T., Boyce A., Watanabe K., and Sereenen J.* Ore mineralogy, and fluid inclusion and stable isotope study of the Olon Ovoot gold deposit, southern Mongolia, Abstracts and oral/poster presentations from SEG 2017: Ore Deposits of Asia: China and Beyond held in Beijing, China, 2017.

## Detailed Geological Mapping of the Olon-Ovoot Gold-Ore Cluster (South Mongolia) Based on the Interpretation of Satellite Imagery of Medium and High Spatial Resolution

M. V. Zadorozhnyy<sup>1</sup>, I. D. Zolnikov<sup>1,2</sup>, N. V. Glushkova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology and Mineralogy V. S. Sobolev SB RAS, Novosibirsk*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk*

Detailed geological mapping of Olon-Ovoot gold-ore cluster (South Mongolia) on the basis of interpretation of satellite imagery of medium and high spatial resolution. The article presents the results of geological interpretation of the territory of the Olon-Ovoot ore cluster by space imagery of medium and high spatial resolution. A Sentinel-2 imagery, chosen for interpretation, was orthorectified and reduced to a common spatial resolution (10m). The iron-hydroxide and ferrous-silicates indices in Sentinel-2 imagery were used to detect the perspective gold-bearing objects. The sub-pixel structure of the imagery Sentinel-2 were analyzed by means of satellite imagery of high spatial resolution by Google Earth for detecting areas concentration of the quartz-carbonate veins. The study of the spectral domain in high-resolution imagery not necessary for detecting lineaments by structural and morphological interpretation. The interpretation of the remote sensing data provide a unique opportunity to substantially specify the geological structure of the territory and change the level of mapping from the scale of 1 : 200 000 to the scale of 1 : 20 000 for the perspective areas. The integration of satellite images of different functional scale provided an tenfold increase for some geological objects (for example dikes). Detailed mapping of the territory allowed to come for geoinformation modeling of geological structural elements and predictive indicators.

**Keywords:** high and medium spatial resolution images, geological mapping, remote sensing, GIS

### REFERENCES

*Amantov V.A., Blagonravov V.A., Borzakovskii Yu.A., Durante M.V., Zonenshain L.P., Luvsandanzan B., Matrosov P.S., Suetenko O.D., Filippova I.B., Khasin R.A.* Osnovnye cherty stratigrafii paleozoya Mongol'skoi Narodnoi Respubliki // Stratigrafiya i tektonika Mongol'skoi Narodnoi Respubliki. Trudy sovmestnoi Sovetsko-Mongol'skoi geologicheskoi ehkspeditsii [The main features of the Paleozoic stratigraphy of the Mongolian People's Republic // Stratigraphy and tectonics of the Mongolian People's Republic. Proceedings of the joint Soviet-Mongolian geological expedition]. Issue 1. M.: Nauka, 1970. P. 8 – 63. (In Russian).

ASTER Mineral Exploration [Electronic resource]. Mode of access: [https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER\\_Processing\\_for\\_Mineral\\_Exploration.pdf](https://remote-sensing.aslenv.com/documents/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf)

*Badarch G., Cunningham W.D., Windley B.F.* A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic

crustal growth of Central Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2002. V. 21. № 1. P. 87-110.

*Bayarjargal B.* The Olon Ovoot Gold-Mineralizing Self-Organized Critical System, Southern Mongolia. California State University, Long Beach, 2017.

*Bayarjargal B., Kelty T., Tseveendorj B., Gankhuu G.* The Olon Ovoot orogenic gold deposit, Southern Mongolia: structural and stable isotope constraints. In 2014 GSA Annual Meeting in Vancouver, British Columbia, October, 2014.

*Borisenko A.S., Ganbat T.S., Akimtsev V.A.* Otchet po kontraktu 1472/14-2002 OIGGM SO RAN-kompaniya «Mongol Gazar». Part. 2. Yuzhno-Gobiiskii zolotorudnyi po yas [Report on contract 1472 / 14-2002 JIHGM SB RAS-company "Mongol Gazar". Part 2. South Gobi gold belt]. 2002. (In Russian).

*Chuluun B., Davkharbayar D., Nyamaa B., Washama S.* Report on detailed prospecting and mineral prediction work carried

- out on Olon Ovoot gold mineralization area. Mongolian. Geological Information Center Open File Report (4780), 1993.
- Index DataBase – A database for remote sensing indices [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.indexdatabase.de>
- Kozakov I.K., Didenko A.N., Azimov P.Ya., Kirnozova T.I., Sal'nikova E.B., Anisimova I.V., Ehrdehnehzhargal C.H.* Geodinamicheskie obstanovki i usloviya formirovaniya kristallicheskih kompleksov Yuzhno-Altayskogo i Yuzhno-Gobiiskogo metamorficheskikh poyasov [Geodynamic settings and conditions for the formation of crystalline complexes of the South Altai and South Gobi metamorphic belts] // *Geotektonika*. 2011. № 3. P. 7–30. (In Russian).
- Marinov N.A., Zonshain L.P., Blagonravov V.A.* Geologiya Mongol'skoi Narodnoi Respubliki. T. 2. // *Magmatizm, metamorfizm, tektonika* [Geology of the Mongolian People's Republic. V. 2. // *Magmatism, metamorphism, tectonics*]. M.: Nedra, 1973. P. 782. (In Russian).
- Safonova I.Y., Santosh M.* Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Research*. 2014. V. 25. № 1. P. 126-158.
- Sarantuya O., Nakanishi T., Yonezu K., Tindell T., Boyce A., Watanabe K., and Sereenen J.* Ore mineralogy, and fluid inclusion and stable isotope study of the Olon Ovoot gold deposit, southern Mongolia, Abstracts and oral/poster presentations from SEG 2017: Ore Deposits of Asia: China and Beyond held in Beijing, China, 2017.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Kozlovskii A.M., Kotov A.B., Lebedev V.I.* Geokhronologiya magmaticheskikh porod i spetsifika formirovaniya pozdne-paleozoiskoi Yuzhno-Mongol'skoi aktivnoi okrainy Sibirskogo kontinenta [Geochronology of igneous rocks and specifics of the formation of the Late Paleozoic South Mongolian active margin of the Siberian continent] // *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*. 2008. V. 16. №2. P. 59–80. (In Russian).
- Zabotkin L.V., Baatar T.S., Bykhover V.N., Vertlib V.I., Gan-Ochir Z.H., Dobrov G.M., Lopatin V.M., Mosiondz K.A., Nikitin L.V., Tsehdehnbal C.H.* List geologicheskoi karty L-48-XXXIII, Masshtab 1 : 200 000 [Geological map sheet L-48-XXXIII, Scale 1: 200 000]. M.: Vsesoyuznoe ehk-sportno-importnoe ob"edinenie «Tekhnoeksport», 1983. (In Russian).