

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КАРТИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ НАБОРА ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ LANDSAT 8 ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2025 г. Ю. Н. Иванова^{1, 2, *}

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук,
Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2024 г.

Впервые по материалам космической съемки космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat 8 выполнено картирование гидротермально-метасоматических изменений для территорий восточного склона Полярного Урала, перспективных на выявление золоторудной минерализации (с севера на юг): Щучинская зона (Юньягинское месторождение), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (месторождения Новогоднее-Монто и Петропавловское) и центральная часть Малоуральской зоны (Мануюлю-Ворчатинский рудный узел). Исследование проведено с целью выявления схожих закономерностей в распределении гидротермально-метасоматических изменений для разработки прогнозно-поискового критерия (вещественного) на золоторудный тип минерализации. Таким образом, было установлено, что на перспективных на золоторудную минерализацию площадях для восточного склона Полярного Урала должны быть локализованы интрузии основного состава, с которыми генетически связана золоторудная минерализация, и проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксида железа (III) и оксида железа (II), и в меньшей степени — оксиды и гидроксиды железа (лимонит), а также гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы.

Ключевые слова: золоторудная минерализация, линеаменты, гидротермально-метасоматические изменения, Полярный Урал, Landsat 8

DOI: 10.31857/S0205961425010041, **EDN:** DHTMEV

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в практике геологоразведочных работ стали применяться в 1970-х годах благодаря внедрению многоспектральных фотографий земной поверхности. Сегодня подобные методы широко используются наряду с традиционными (геологическими, геофизическими, геохимическими и др.) для прогнозирования различных типов рудной минерализации (di Tommaso, Rubinstein 2007; Zhang et al. 2007; Pour, Hashim, 2011; Amer et al., 2012).

В последнее время Арктика привлекает большое внимания научных кругов по всему миру, и все больше научных миссий нацелены на этот регион из-за огромных и разнообразных запасов полезных ископаемых (ПИ), которые все еще плохо изучены.

Решение многих специфических задач в Арктике, включая прогнозирование залежей руды, также может быть решено с помощью космических технологий, обеспечивающих множество преимуществ для исследовательских и опытно-конструкторских проектов на этой площади, позволяющих проводить широкомасштабные и относительно рентабельные наблюдения и сбор данных в регионе с ограниченной наземной инфраструктурой (Bohlmann, Koller, 2020).

В настоящее время в специализированных журналах и книгах, посвященных ДЗЗ, очень мало работ по теме прогнозирования рудной минерализации и картированию гидротермально-метасоматических изменений на арктической территории (например, Pour, Hashim, 2012; Graham et al., 2017; Иванова и др., 2022, 2023 и др.).

В данной статье представляются результаты картирования гидротермально-метасоматических изменений по данным мультиспектральных спутниковых изображений с космического аппарата (КА) ДЗЗ Landsat 8 для территорий восточной части Полярного Урала, входящих в Российскую часть Арктики. Это исследование поможет выявить вещественный прогнозно-поисковый критерий для золоторудной минерализации, который может быть использован в качестве вспомогательного средства для разведки ПИ в других районах Полярного Урала и северных широтах.

Выбраны следующие площади (с севера на юг): Щучинская зона (Юньягинское месторождение), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (месторождения Новогоднее-Монто и Петропавловское) и центральная часть Малоуральской зоны (Манюкую-Ворчатинский рудный узел), являющиеся наиболее перспективными на выявление золоторудной минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Полярно-Уральский сегмент Восточно-Уральской мегазоны разделяют на Щучинскую и Войкарскую зоны (рис. 1).

Эти зоны характеризуются осадочно-вулканогенными отложениями с широко проявленным plutоническим и гипабиссальным магматизмом, сравнительно слабым динамотермальным и интенсивным дислокационным метаморфизмом. Формации отвечают обстановкам океанического рифтинга островодужных систем и активной континентальной окраины (Пучков, Иванов, 2020).

Щучинская зона — самая северная часть палеозойской островодужной системы Урала. На западе она ограничивается региональным разломом, входящим в систему Главного Уральского разлома (ГУР). Он представляет собой крупный надвиг, перекрытый мезозойскими отложениями в восточном направлении. Его фрагмент обрамляет Щучинский синклиний в виде дугообразных нарушений, которые сливаются в единую полукольцевую структуру.

В строении Щучинской зоны выделяют несколько сегментов, в пределах которых установлены: палеозойские покровно-складчатые сооружения, представленные породами ордовика, силура, девона, карбона, перекрытые платформенными мезозойскими отложениями юры и триаса. Наиболее широкое развитие среди plutонических образований получили габброиды, гранитоиды имеют значительно меньшее распространение и локализованы в виде небольших штокообразных массивов площадью до 10–16 км² (Душин, 2020).

Например, с магматическими и вулканогенно-осадочными породами основного состава васькеуского и харампэйско-масловского комплексов, а также янганапэйской толщи связаны проявления и месторождения V±Ti-Fe-рудной и Cu-Fe-скарновой формаций. Осадочные породы малопайпунской и хантейской свит вмещают проявления Pb-Zn минерализации. С магматическими породами основного состава второй фазы харбей-собского комплекса связаны проявления Mo, Pb-Zn, Cu-кварцевой и скарно-магнетитовой минерализации. К магматическим породам кислого состава сядатаяхинского и евьюганского комплексов относятся месторождения и проявления As, Au, Mo и Cu минерализации. В осадочных породах хойдышорской и усинской свит локализована Cu и Au минерализация, а в метаморфических и осадочных породах орангской свиты — полиметаллическая минерализация. С магматическими породами ультраосновного состава сьум-кеуского комплекса и дайками серпентинитов хартманюшорского комплекса пространственно и генетически связаны проявления Cr. В эклогитоподобных породах слюдногогорского комплекса содержатся проявления метаморфогенного Ti (Зылева и др., 2014).

Отдельно для этой зоны можно выделить вторую фазу габбро-гранодиорит-гранитового юньягинского комплекса, с которым генетически связаны золотосодержащие скарново-магнетитовые месторождения и рудопроявления, локализованные в одноименном рудном узле. Юньягинское месторождение в настоящее время представляет промышленный интерес. Помимо данного объекта рудный узел вмещает ряд рудопроявлений и пунктов минерализации Cu-Fe-рудной скарновой с Au, Ti-Fe-рудной мафитовой (волковский тип), Ti-Fe-рудной ультрамафит-мафитовой (качканарский тип) и Ti-Fe-рудной метаморфогенной формаций (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

Месторождение Юньягинское расположено в 10 км восточнее железнодорожной ветки Обская—Бованенково. Другие известные перспективные рудопроявления и пункты минерализации изучены гораздо хуже.

Более подробное геологическое описание Щучинской зоны можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014; Andreichev et al., 2017; Соболев и др., 2018; Душин, 2020; Пучков, Иванов, 2020 и др.).

Войкарская зона имеет субмеридиональное ССВ простирание и представляет собой ряд аллохтонов, полого погружающихся в ВЮВ направлении. Зона существенно тектонизирована и разбита надвигами на отдельные пластины. Аллохтоны состоят из вулканогенных и терригенно-вулканоген-

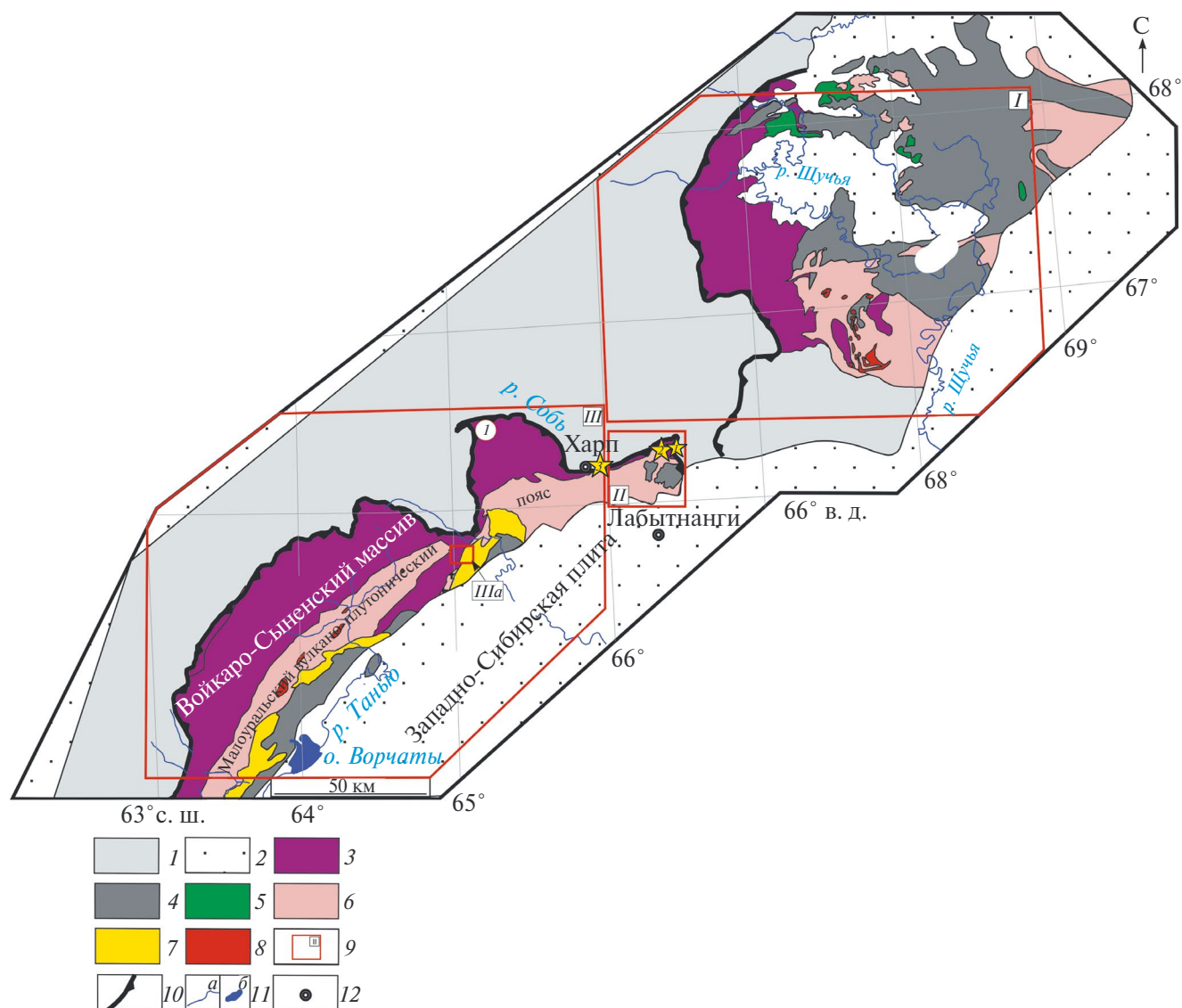


Рис. 1. Тектоническая схема Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–9 – Восточно-Уральская мегазона: 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагиогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юнгягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монцониитоиды конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменекского и янослорского комплексов; 9 – границы изучаемых территорий: Щучинская зона (I), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (II), центральная часть Малоуральской зоны (III), Манюкую-Ворчатинский рудный узел (IIIa); 10 – ГУР; 11 – основные реки и озеро; 12 – города. Желтыми звездочками показаны: месторождения Новогоднее-Монто (1), Петропавловское (2) и рудопроявление Амфиболитовое (3), цифрой 1 показан массив Рай-Из.

ных пород палеозойского возраста океанического и надсубдукционного происхождения. Подошва аллохтонов (в западной части Войкарской зоны) ограничена ГУР. Восточная часть зоны сложена ранне-среднепалеозойскими и позднекембрийскими блоками в различной степени метаморфизованных ультраосновных и основных пород офиолитовой ассоциации. Эти блоки слагают горные

массивы Рай-Из и Войкаро-Сынинский в осевой части Уральского хребта (см. рис. 1). Восточнее ГУР расположены девонские надсубдукционные plutонические, гипабиссальные, а также ассоциирующие с ними преимущественно вулканические и вулканогенно-осадочные образования (D_3-S_2) Восточной подзоны (Малоуральская зона) (Ремизов и др., 2014).

Малоуральская зона в среднем палеозое (O_3-C_1) представляла собой либо островную дугу (O_3-D_1), сменившуюся в раннем девоне окраинно-континентальным вулканоплутоническим поясом (Язев, Бочкарев, 1984), либо островную дугу, сформированную на гетерогенном основании (Кузнецов и др., 2000). На севере и западе Войкарской подзоны массивы Войкаро-Сыньинский и Рай-Из обрамлены с юга и востока полосой габбро-амфиболитов. На востоке расположены ордовикско-девонские островодужные плутонические и осадочно-вулканические комплексы, объединенные в Малоуральскую подзону. На востоке Малоуральской подзоны выходят на поверхность вулканические толщи (O_3-D_2) с тонкими прослоями осадочных пород, прорванными интрузиями разного состава (от габбро до гранитоидов) (Государственная..., 2007). Эти вулканические толщи являются частью палеозойской островодужной системы Полярного Урала, которая в эйфеле и вплоть до пермского столкновения с Восточно-Европейским континентом развивалась, скорее всего, как зрелая островная дуга (Estrada et al., 2012; Викентьев и др., 2017).

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район локализован на СВ-окончании Малоуральского вулканоплутонического пояса и представляет собой локальное вулканотектоническое поднятие, осложняющее вулканотектоническую депрессию, и приурочено к пересечению зон разрывов субмеридионального, СВ и СЗ-простираций, которые ограничивают его и контролируют позицию золоторудных месторождений и проявлений. Разломы СВ-простиражения обуславливают блоковое строение рудного района и определяют позицию интрузивных тел, даек и апофиз Собского плутона. Все образования района прорваны дайками и силлами габбро-долеритов и лампрофиров малоханмейского комплекса (C_1). Здесь известны два месторождения: Петропавловское (Au-порфировое) и Новогоднее-Монто (Au-Fe-скарновое) (см. рис. 1), а также ряд рудопроявлений – Западное, Караченцева, Карьерное и др. (рис. 3) – Fe-Au-скарнового, золото-кварцевого и золото-порфирового типов (Викентьев и др., 2017).

Манюкую-Ворчатинский рудный узел состоит из вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород малоуральской свиты ($S_2-D_{3k_2}$), прорванных интрузивными образованиями собского и конгорского комплексов. Свита характеризуется фациальной невыдержанностью и сложена разнообломочными туфами и туффитами пироксен-плагиоклазовых андезибазальтов с потоками базальтов и андезибазальтов, прослоями туффитов и туфопесчаников. Изредка встречаются биогермы, сложенные рифогенными известняками (Шишкин и др., 2009;

Кременецкий и др., 2012). В целом петрогеохимический состав и петрографические особенности вулканических и туфогенных пород свиты указывают на то, что они произошли в результате эксплозивной деятельности вулканов центрального типа в палеогеодинамической обстановке субдукционной стадии (Шишкин и др., 2009). Чередование в разрезе пачек вулканогенных и осадочных пород указывает на периодическую активизацию вулканической деятельности в период накопления пород свиты.

Интрузивные комплексы включают образования собского (D_{1-2k}) и конгорского (D_3-C_{1k}) комплексов. Собский комплекс состоит из крупных интрузивов габбро, диоритов и тоналитов, обрамляющих полосу вулканитов с запада. К конгорскому комплексу отнесены небольшие интрузивы и дайковые образования, встречающиеся среди полей вулканитов: габбро, габбро-диориты, диориты, монцодиориты (Шишкин и др., 2009).

Здесь выявлены разнообразные объекты с железорудной минерализацией. Наиболее перспективные – контактово-метасоматический (скарновый), гидротермально-осадочный, магматический, Ti-магнетитовый типы (Первая и Третья Рудные Горки). Также встречаются немногочисленные проявления Ti и Mo минерализации. Кроме того, широко проявлены Cu оруденения, которые представлены как собственно меднорудными, так и комплексными объектами, где Cu ассоциирует с Pb и Zn, Ag, Au, Mo и другими металлами (проявления Янаслорское, Элькошорское, Мокрый Лог, Осеннее и др.).

Более подробное геологическое строение центральной части Малоуральской зоны и Тоупугол-Ханмейшорского рудного района можно найти в опубликованных отчетах (Галлиулин и др., 2005; Перминов и др., 2009 и др.; Бутаков и др., 2012; Кременецкий, 2012; Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014 и др.) и работах (Черняев и др., 2005; Кениг, Бутаков, 2013; Викентьев и др., 2017).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Получены безоблачные дневные сцены КА Landsat 8:

Щучинская зона: LC08_L1TP_165012_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.) и LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.); Тоупугол-Ханмейшорский рудный район: LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.); центральная часть Малоуральской зоны: LC08_L1TP_166013_20160821_20170322_01_T1 (21.08.2016 г.).

Изображения взяты из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

Геологическая информация для изучаемых площадей представлена в виде геологических карт дочетвертичных образований и карт ПИ (масштабы карт 1:1000000, листы Q-41 и Q-42), которые составлены в рамках госзадания Института Карпинского в 2007 и 2014 гг. (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаменты — это прямые или приблизительно линейные формы рельефа, которые широко распространены на поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами каркаса разрывных нарушений. Ориентировка и количество линеаментов отражают характер трещиноватости массивов горных пород и могут нести ценную информацию о геологических структурах, тектонике и локализации ПИ (например, Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Thannoun, 2013; Миловский и др., 2021; Иванченко и др., 2022), выделения кальдер (Ананьев, 2017; Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализация (Лесняк и др., 2022; Коротков, 2023) и др.

Методика выделения линеаментов ручным способом на основе КС приведена в работе (Иванова и др., 2020).

С результатами линеаментного и морфоструктурного анализа для изучаемых территорий можно ознакомиться в работах (Викентьев и др., 2021; Иванова, Нафигин, 2023; Иванова, 2024).

Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля метасоматически-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в диапазоне датчика КА ДЗЗ. Поэтому для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц (Mauger, 2013; Коротков, 2023) широко используется метод соотношения полос (band ratios). Данный метод усиливает спектральные особенности пикселей изображений на основе вычисления отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Выбор подобных каналов производится, исходя из отражающей способности искомого минерала. При этом в числителе должен располагаться канал, характеризующий наиболь-

шую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе — наименьшую. В результате искомый минерал (или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении.

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА Landsat-8 разработано несколько минералогических индексов (Pour et al., 2018): 4/2 — минералы группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ильменит), а также ярозит и их смесь — лимонит; 6/4 — минеральные ассоциации с преобладанием оксида двухвалентного железа (магнетита); 6/5 — минеральные ассоциации с преобладанием оксида трехвалентного железа (гематита); 6/7 — гидроксилсодержащие (Al-OH и Fe,Mg-OH), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весомые показатели (индикаторы) Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH и Si-OH групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

Метод главных компонент (МГК) — это многомерный статистический метод, который позволяет выбирать некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственного вектора) переменных так, что каждый извлеченный компонент имеет наименьшую дисперсию. Более подробную информацию о методе можно найти в работах (Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017). Первая главная компонента (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как она характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

МГК преобразует набор коррелированных данных в некоррелированные линейные данные. МГК широко используется для картирования гидротермальных минералов и литологических единиц на основе спектральных каналов-сенсоров КА ДЗЗ (Loughlin, 1991). Данный метод применен к анализу ранее полученных минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы. Подобный подход позволяет статистически оценить надежность пространственного распределения соответствующих вторичных минералов в исследуемом районе.

В качестве входных данных для МГК традиционно выступают спектральные каналы КС, но для наиболее эффективной статистической оценки надежности пространственного распределения соответствующих гидротермальных минералов в исследуемом районе использованы результаты оценки минералогических индексов с применением ковариационной матрицы.

Систематизация и обобщение данных выполнены в программной среде QGIS. Все имеющиеся данные собраны и визуализированы в едином ГИС-проекте.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой территории при анализе КС были выделены 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов и раздельно показанных на рис. 2, 3, 5.

Для территории Щучинской зоны распределения оксидов двух- и трехвалентного железа, особенно с высоким содержанием, в целом совпадают. При этом наибольшее скопление средних и высоких концентраций локализовано на севере, западе и юге территории. В меньшей степени совпадает расположение повышенных значений гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, и оксидов, и гидроксидов железа (лимонит) (см. рис. 2).

Это можно объяснить наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов (например, яны-маньинской, тольинской, теунтойской и лаборовской свит), которые представлены разнообразными осадочными породами (пески, гравийники, галечники, конгломераты, пласты бурых углей, алевролиты, песчаники, углестые глины, глины) мощностью до 450 м.

Кроме того, минералы оксидов двух- и трехвалентного железа в рудах месторождения Юньягинское образуют сложные сростания (пойкилитовые, миремкитоподобные) как с рудными (в том числе гематитом и пиритом), так и нерудными минералами (Зылева и др., 2014).

Исследователями Института Карпинского (Зылева и др., 2014) на этой площади были выделены зоны березитоподобных метасоматитов, к которым принадлежат объекты Mo, Au, Au-Fe и Pb-Zn минерализации (см. рис. 2).

Данные зоны слабо отражаются в полученных дистанционных результатах, что обусловлено также большой толщиной четвертичных отложений. В местах, где отложения сокращаются в мощности, наблюдается их совпадение (горные области).

Основными факторами, контролирующими размещение Mo минерализации на территории Щучинской зоны, являются магматический (рудогенерирующие кислые интрузии доордовикских комплексов) и гидротермально-метасоматический (рудоносные и рудовмещающие грейзены, жильные штокверки).

Большинство железорудных объектов (Cu-Fe-рудная скарновая (Au-содержащая) формация)

относится к двум генетическим типам: магматическому и контактово-метасоматическому. Для обоих главным рудоконтролирующим фактором является также магматический. Основные интрузивы — одновременно рудогенерирующими и рудовмещающими. Кислые плутониты (D_{1-2}) обеспечивают скарнообразование, локализующееся исключительно в осадочно-вулканогенных толщах силура, которые прорываются гранитоидами собского и юньягинского комплексов. Кроме того, золоторудная минерализация, содержащаяся в скарново-магнетитовых месторождениях и рудопрооявлениях, генетически связана с габбро и диоритами.

Pb-Zn минерализация локализована на контакте гнейсированных роговообманковых диоритов и аповулканогенных сланцев. Выделяется “мраморно-лептитовый горизонт” с парагенезисом минералов, близким к скарнам; по последним развиваются более поздние березиты (Зылева и др., 2014).

В Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе наиболее высокими концентрациями индекса оксида железа (III) выделяется участок с известными золоторудными месторождениями Петропавловское и Новогоднее-Монто (см. рис. 3).

На вулканические породы среднего и основного состава (базальты, андезибазальты, реже андезиты) тоупугольской толщи наложены продукты зачастую совмещенных в пространстве разновозрастных процессов скарнирования, березитизации и окварцевания. Эти метасоматические проявления связаны с дайками кварцевых монцодиорит-порфиров и кварцевых габбро конгорского комплекса первой и второй фаз внедрения (D_{2kn1} , D_{2kn2}), а также пропилитизацией, которой подверглись плагиограниты и другие гранитоиды поздней фазы собского комплекса (D_{2s}). С зонами пропилитизации связано развитие мелкой вкрапленности сульфидов Cu и Fe, по которым в зоне гипергенеза развиваются продукты окисления сульфидов (Викентьев и др., 2021).

Кроме того, в аншлифах месторождений Новогоднее-Монто и Петропавловское можно также встретить оксиды железа II и III в виде сростаний и разнообразных структур распада (рис. 4).

Исследователями Института Карпинского (Зылева и др., 2014) на этой площади была выделена зона березитоподобных метасоматитов с крутым СВ-падением, которая простирается в СЗ-направлении и прослежена скважинами в Новогодненском рудном поле до глубин 150–250 м с содержанием золота более 1 г/т. Данная зона слабо отражается в полученных дистанционных результатах, что обусловлено большой мощностью четвертичных отложений, которая здесь достигает 93 м (Зылева и др., 2014). В ЮВ-части зоны, где рыхлые отложения хотя и присутствуют, но сокращаются в мощности

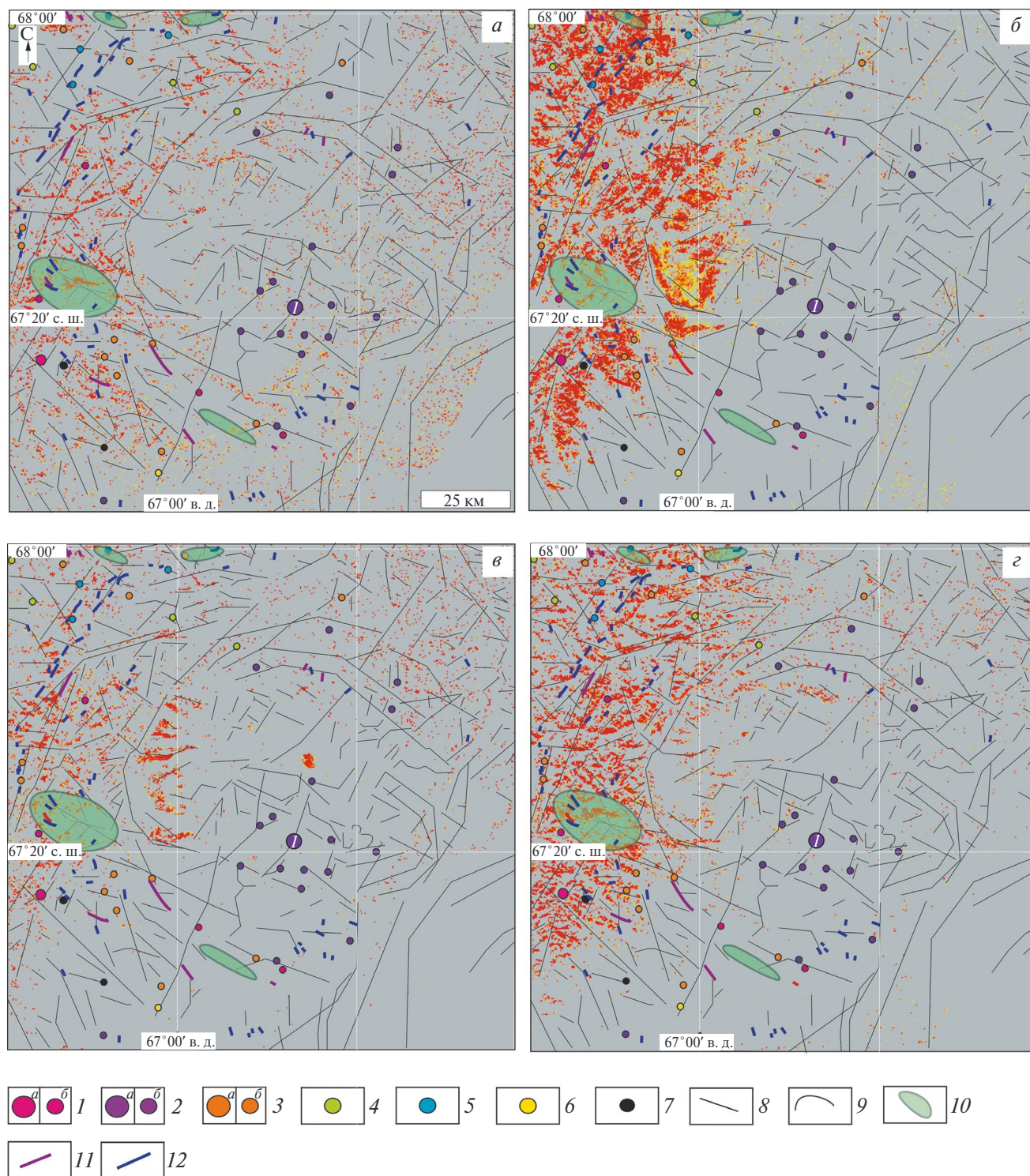


Рис. 2. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для Щучинской зоны, полученные в результате обработки КС КА Landsat 8, с нанесенными на них линейментами, выделенными ручным способом, по КС КА Landsat 8: *а* – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, *б* – оксиды трехвалентного железа (гематит), *в* – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), *г* – оксиды двухвалентного железа (магнетит). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный. 1-7: месторождения (*а*), рудопроявления (*б*): 1 – Mo, 2 – Fe, 3 – Au, Au-Fe, 4 – Cu, 5 – Pb-Zn, 6 – As-Mo-Au, 7 – Ti; 8-9 – радиальные (8) и дуговые (9) линеймента; 10 – зона березитизации; 11-12 – дайки основного (11) и кислого (12) состава, вынесенные с геологической карты (Зылева и др., 2014). Месторождение Юньягинское обозначено цифрой 1.

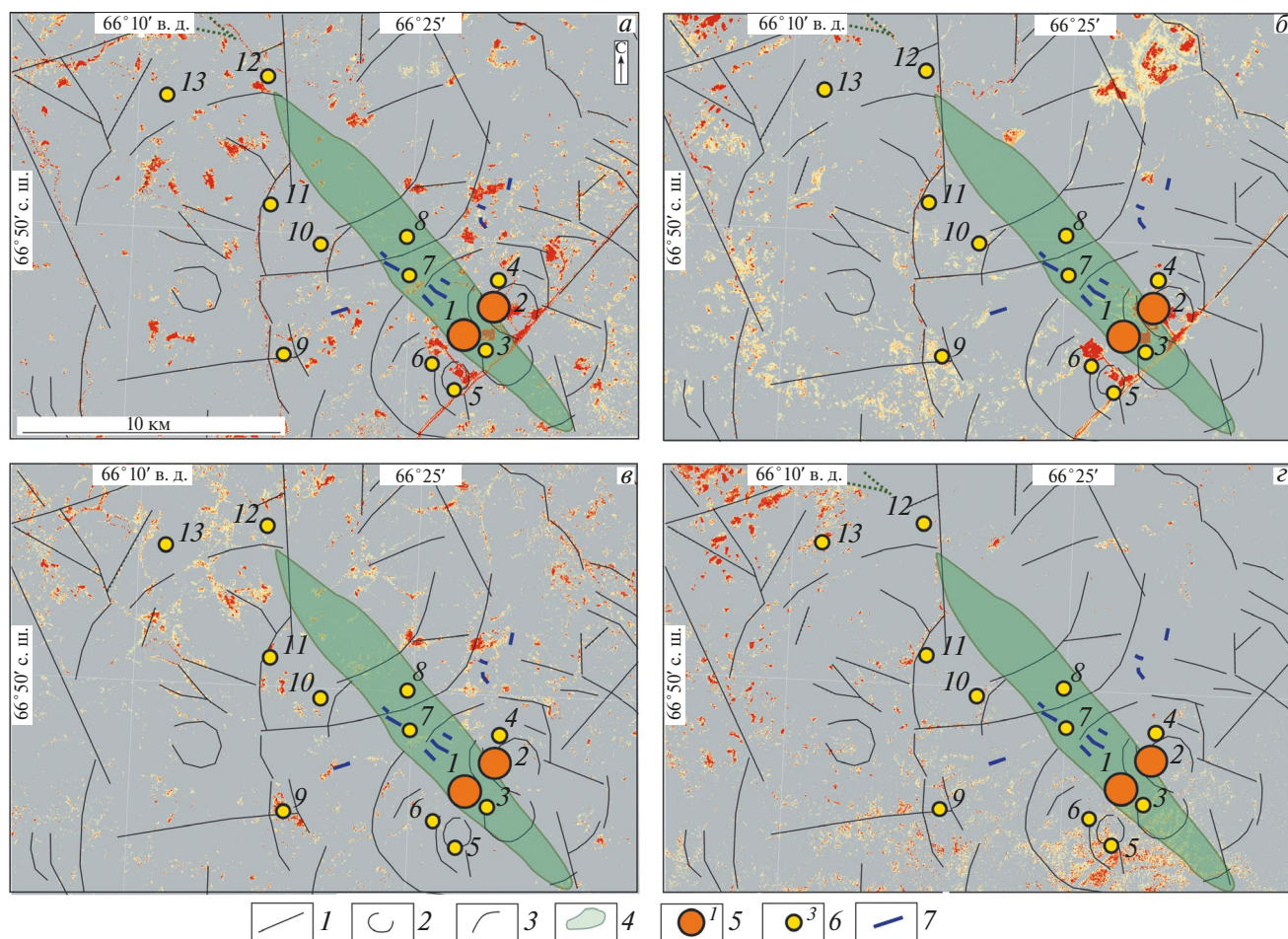


Рис. 3. Карта гидротермальных изменений для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории: а–г – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов соответствуют рис. 2; 1–3 – разрывные нарушения, выявленные в ходе анализа КС КА ДЗЗ Landsat 8: 1 – радиальные; 2 – кольцевые; 3 – дуговые; 4 – зона беззитизации, вынесенная с геологической карты (Зылева и др., 2014); 5–6 – месторождения и рудопроявления: Петропавловское (1), Новогоднее-Монто (2), Караченцева (3), Тоупугол (4), Карьерное (5), Тоунугольское (6), Аномальное (7), Ханмейшорское (8), Невидимка (9), Обское (10), Малоханмейское (11), Евъеганское (12), Евъюгань (13); 7 – дайки основного состава, вынесенные с геологической карты (Зылева и др., 2014). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный.

до 3–6 м, наблюдается их совпадение. Таким образом, можно заключить, что ореолы окolorудных изменений, погребенных более чем на 6 м, не находят свое отражение на КС.

Месторождения и рудопроявления на территории центральной части Малоуральской зоны представлены следующей минерализацией: Cu-Zn-Mo, Mo-Cu, Fe-Ti-V-Cu и Au.

К наиболее перспективным объектам с железорудной минерализацией на данной площади относятся контактово-метасоматический (скарновый), гидротермально-осадочный, магматический, Ti-магнетитовый типы. Например, с процессами контактового преобразования связаны проявления скарнового типа Первая и Третья Рудные Горки.

Проявления Ti минерализации генетически делятся на магматические и осадочные типы. В первом – Ti связан с железом и входит в состав титаномагнетита или образует самостоятельную минеральную фазу – ильменит. Как правило, наиболее обогащены титаном породы семейства габбро, где титановые минералы иногда образуют рассеянную вкрапленность и шширообразные скопления (собский габбро-диорит-тоналитовый комплекс). Кроме того, в титаномагнетитовых проявлениях установлены повышенные содержания V.

Мо минерализация связана с гранитоидами и, вероятно, относится к одному (штокверковому Cu-Mo- или V-Mo-порфировому) геолого-промышленному типу.

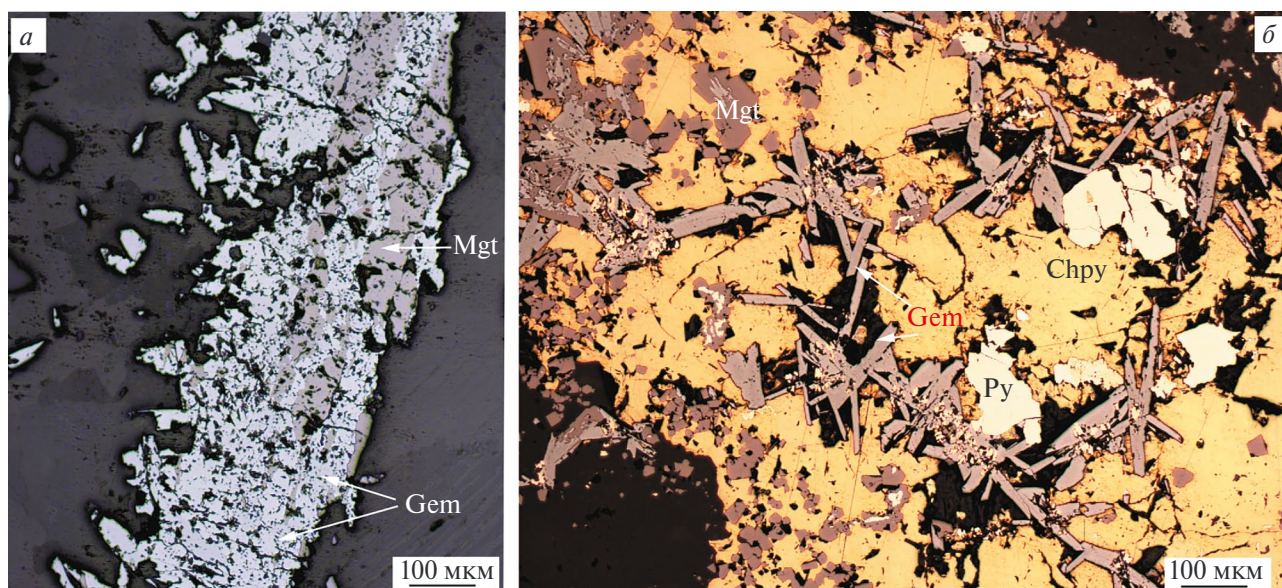


Рис. 4. Структуры распада месторождения Новогоднее-Монто (обр. НМ-4 и НМ-27): аллотриоморфные агрегаты гематита замещают ксеноморфные зерна магнетита в окварцованном скарне (а), неправильные скопления халькопирита замещают разноориентированные игольчатые кристаллы гематита и ксеноморфные зерна магнетита и пирита, локализованные в эпидот-гранат-пироксеновом скарне (б). Условные обозначения: Mgt – магнетит, Py – пирит, Gem – гематит, Chpy – халькопирит.

Си оруденение на площади листа проявлено очень широко и представлено как собственно меднорудным, так и комплексными объектами, в которых Си ассоциирует со Pb и Zn, Ag, Au, Mo и другими металлами. Например, оруденение Мо-Си-порфировой формации развито в пределах Малоуральского вулcano-плутонического пояса и представлено проявлениями Янаслорское, Элькошорское, Мокрый Лог и др. Первое из них локализовано в гранитоидах и имеет преимущественно Си-Мо специализацию. Рудопроявления Мокрый Лог и Осеннее связаны с интрузиями кварцевых монцодиоритов конгорского комплекса, прорывающих вулканогенно-осадочные породы малоуральской свиты. В экзоконтактах интрузии проявлены эпидотизация, окварцевание, скарнирование. На отдельных участках рудопроявления Мокрый Лог наблюдается развитие кварц-серicitовых метасоматитов-филлизитов (березитов). Эти образования сопровождаются интенсивной халькопиритовой минерализацией (содержания Си до 0.7%).

Кроме того, малоуральская свита, состоящая из вулканогенно-осадочных и осадочных пород, является благоприятной средой для локализации скарно-магнетитового и медно-порфирового оруденения.

Золоторудные объекты парагенетически связаны с интрузиями и ореолами метасоматитов в зонах разломов (Шишкин и др., 2009).

По данным КС КА Landsat 8 распределение оксидов трех- (гематит) и двухвалентного (магнетит) железа, особенно с высоким содержанием, также совпадает и для центральной части Малоуральской зоны, однако средние концентрации трехвалентного железа чуть выше и распределены более равномерно по всей изучаемой площади, чем двухвалентного (рис. 5б, г). Распространение гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) отличаются. Последние распределены (высокие и средние концентрации) в основном на ЮВ территории (см. рис. 5).

В аншлифах рудопроявления Амфиболитовое – центральная часть Малоуральской зоны (см. рис. 1) также присутствуют эти оксиды железа II и III совместно в виде разнообразных структур распада (рис. 6) (Иванова, Тюкова, 2022).

Таким образом, в результате анализа и сопоставления площадей выявлены закономерности на золоторудный тип минерализации для восточного склона Полярного Урала:

– изучаемые площади имеют разнообразную рудную специализацию, в том числе золоторудную (Au-сульфидно-Fe-скарновая), где Au является либо единственным полезным компонентом, либо одним из основных ценных элементов (Au-содержащие рудные формации: Cu-Fe-скарновая, V-Fe-Cu, Cu-Mo-порфировая и др.). При этом золоторудная минерализация имеет широкий спектр

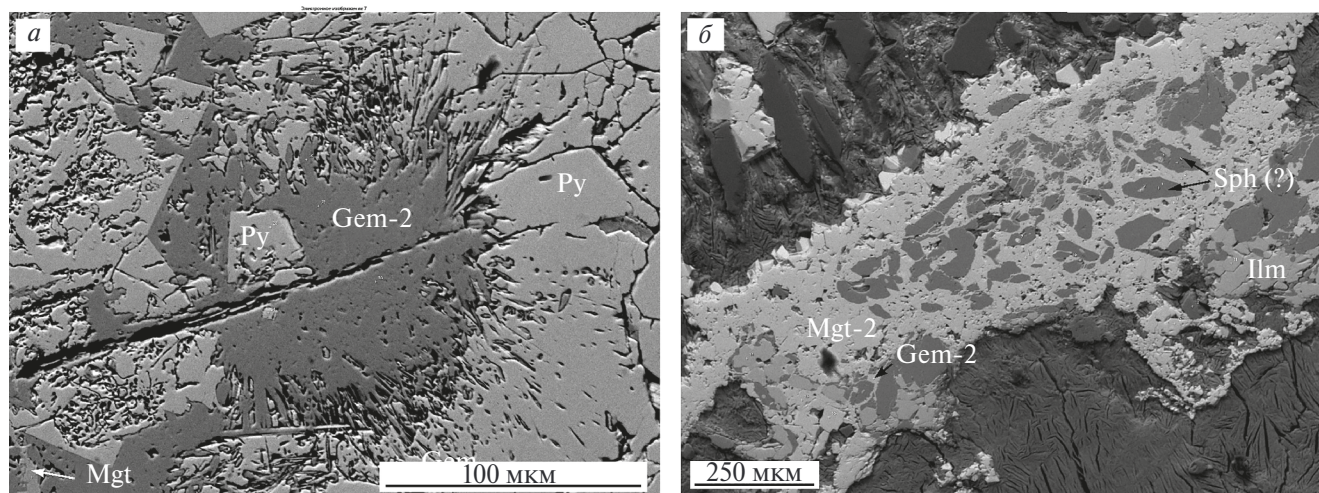


Рис. 6. Структуры распада рудопоявления Амфиболитовое (обр. А-973): радиально-лучистый агрегат (волокнистая структура) гемматита-2, сосредоточенный в катакlastическом изъеденном пирите, локализованном в пироксении (?) (а), петельчатая структура, представленная ксеноморфным магнетитом, окаймляющим овальные включения сфена (?), ксеноморфные включения гематита и ильменита до 200 мкм локализованы также в магнетите, но по краям структуры (б). Условные обозначения: Mgt – магнетит, Py – пирит, Gem – гематит, Sph – сфен, Ilm – ильменит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки данных КА ДЗЗ Landsat 8 построены карты распространения гидро-термальных изменений для территории Щучинской зоны, Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и центральной части Малоуральской зоны: гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие породы, оксиды двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), оксиды и гидроксиды железа (лимонит), – с использованием спектральных каналов КА ДЗЗ Landsat 8 (минералогические индексы) и МГК.

На основании полученных в ходе исследования результатов можно сделать вывод, что на площадях, перспективных на золоторудную минерализацию для восточного склона Полярного Урала, должны быть локализованы интрузии основного состава, с которыми генетически связана золоторудная минерализация, и проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксида железа (III) и оксида железа (II), и в меньшей степени – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), а также гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке молодежной лаборатории ИГЕМ РАН “Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований” в рамках темы государственного задания “Применение со-

временных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С. Золото-концентрирующие системы Южного складчатого обрамления Западно-Сибирской плиты (на примере Западной Калбы). Дис. ... док.геол.-минер. наук. Томск, 2017. 509 с.
- Бутаков К.В., Гандулкадыров М.М., Шамсутдинова Р.Р. Оценочные работы на золотое оруденение в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Отчет о результатах работ за 2010–2012 гг. Результаты оценочных работ в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Лабитнанги, 2012. 126 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Галиуллин И.З., Перминов И.Г., Коновалов Ю.И. и др. Специализированные геохимические поиски на благородные и редкие металлы в пределах Западно-Харьбейской площади за 2004–2005 гг., Лабитнанги, 2005.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

- Душин В.А. Геологическое строение и магматизм Щучинского мегаблока (Полярный Урал) // Известия УГГУ. 2020. Вып. 4(60). С. 35–56.
- Зылёва Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П., Жданов А и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И. Структурный контроль золоторудной минерализации восточного склона Полярного Урала по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 60–73.
- Иванова Ю.Н., Нафигин И.О. Применение набора данных Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM для прогнозирования золото-полиметаллической минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны, Полярный Урал // Исследования Земли из космоса. 2023. № 6. С. 20–34.
- Иванова Ю.Н., Тюкова Э.Е. Структуры распада в рудах про掖ания Амфиболитовое (Полярный Урал) // II науч. конф. “Геология континентальной окраины”. Владивосток, 2022. С. 143–145.
- Иванова Ю.Н. Прогнозирование перспективных площадей на золоторудный тип минерализации на основе интеграции геологической, геофизической информации и обработки набора данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2 для территории северного окончания восточного склона Полярного Урала // Исследования Земли из космоса. 2024 (в печати).
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Черемных А.В. Некоторые возможности линеamentного анализа при картировании разноранговых разломов (на примере Прибайкалья) // Исследование Земли из космоса. 2022. № 3. С. 66–83.
- Кениг В.В., Бутаков К.В. Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское – новый золоторудный район на Полярном Урале // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 22–24.
- Коротков В.В. Геохимические и другие технологии, методы и методики при прогнозировании и поисках месторождений (преимущественно “скрытого” типа) // ФГБУ “ВИМС”, 2023. 166 с.
- Кременецкий А.А. Обоснование поисковых и поисково-ревиционных работ на рудное золото в пределах Манюкую-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Масштаб 1:10000. М.: ФГУП ИМГРЭ. 2012. 45 с.
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В. Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн лет // Бюлл. МОИП, отд. геол. 2014. Т. 89. Вып. 5. С. 56–70.
- Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпitherмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 333. № 10. С. 17–34.
- Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю. Структурные, геофизические и геохимические критерии эпitherмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 60–72.
- Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т., Апарина А.Д. Применение космической съемки высокого разрешения при поисках прибрежных россыпей и месторождений углеводородов в северных морях России // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 74–82.
- Прямоносоев А.П., Степанов А.Е., Телегина Т.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 (издание второе). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XII. Объяснительная записка. Салехард: Комитет природных ресурсов по Ямало-Ненецкому автономному округу, 2001. 231 с.
- Пучков В.Н., Иванов К.С. Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектон. 2020. № 1. С. 41–61.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 (2-е изд., циф.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объяс. зап. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удортина О.В. и др. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Черняев Е.В., Черняева Е.И., Седельникова А.Ю. Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Мат. конф. XI Чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.
- Шишкин В.А., Жигалов С.В., Грищенко Ш.Г. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200 000 (новая серия). Лист P-55-XII. Объяснительная записка. СПб.: 2008.
- Язева Р.Г., Боцкарев В.В. Войкарский вулcano-плутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 156 с.
- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A. Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // Doklady Earth Sciences. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmann U.M., Koller V.F. ESA and the Arctic - The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. Jour.of Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
- Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infierillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geol. Rev. 2007. V. 32. P. 275–290.
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // Jour. of Comp.and Geos. 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D. et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // Econ. Geol. 2018. V. 113 (2). P. 489–510. DOI: 10.5382/econgeo.2018.4559.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // Economic Geology. 1994. V. 89. P. 1906–1923.

- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T.* Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, UK, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57 P. 1163–1169.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M., and et al.* Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masoud A.A., Koike K.* Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // Tectonophysics. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Mather P.M.* Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
- Maurer T.* How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method—a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101.
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Review. 2012. V. 44. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. № 16. P. 23–46.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin. 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319-7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // Indonesian Journ. of Geography. 2019. 51, 1. P. 31–41.
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B.* Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. V. 113(D23).
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogram. and Rem. Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.

Mapping of Hydrothermal-Metasomatic Alteration for Prediction Gold Mineralization Based on Processing a Dataset of the Landsat 8 Remote Sensing Spacecraft for the Territory of the Eastern Slope of the Polar Urals

J. N. Ivanova^{1,2}

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

²*RUDN University, Moscow, Russia*

Based on satellite imagery from Landsat 8, an analysis was made of the territories of the eastern slope of the Polar Urals that are promising for identifying gold mineralization (from north to south): Shchuchinsky zone (Yunyaginsky deposit), Toupugol-Khanmeishorsky ore district (Novogodnee-Monto and Petropavlovskoye deposits) and the central part of the Malouralsk zone (Manyukuyu-Vorchatinsky ore cluster). The study was carried out with the aim of identifying similar patterns in the distribution of hydrothermal-metasomatic changes in order to develop a forecast and search criterion (material) for the gold ore type of mineralization. It was found that in areas promising for Au mineralization on the eastern slope of the Polar Urals, intrusions of basic composition should be localized, with which gold mineralization is genetically associated and metasomatic halos of a significant area (more than 30 km²) with increased values of iron (III) oxide indices should be localized. And iron (II) oxide, and to a lesser extent — iron oxides and hydroxides (limonite), as well as hydroxyl-(Al-OH, Mg-OH) and carbonate-containing minerals.

Keywords: gold mineralization, lineaments, morphostructures, hydrothermal-metasomatic alteration, the Polar Urals, Landsat 8

REFERENCES

- Ananiev Yu.S. Gold-concentrating systems of the Southern folded framing of the West Siberian plate (on the example of the Western Kalba). Dis. ... dok.geol.-miner. Sciences. Tomsk, 2017, 509 p. (In Russian).
- Andreichiev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A. Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // Doklady Earth Sciences. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmanna U.M., Koller V.F. ESA and the Arctic – The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. Jour. of Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
- Chernyaev E.V., Chernyaeva E.I., Sedelnikova A.Yu. Geology of the gold-skarn deposit Novogodnee-Monto (Polar Urals) // Skarns, their genesis and ore content (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Mat. conf. XI Readings A.N. Zavaritsky. Yekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2005, pp. 131–137.
- Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geol. Rev. 2007. V. 32. P. 275–290.
- Dushin V.A. Geological structure and magmatism of the Shchuchinsky megablock (Polar Urals) // News of the USGU. 2020. Issue. 4(60). P. 35–56. (In Russian).
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // Jour. of Comp. and Geos. 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Galiullin I.Z., Perminov I.G., Konovalov Yu.I., et al. Report on the results of works on completion of the object: "Specialized geochemical prospecting for noble and rare metals in within the West Harbeyskaya area Labytnangi", 2005.
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D., et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // Econ. Geol. 2018. V. 113 (2). P. 489–510. DOI: 10.5382/econ-geo.2018.4559.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // Economic Geology. 1994. V. 89. P. 1906–1923.
- Gupta R.P. Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V. Some possibilities of lineament analysis when mapping faults of different ranks (using the example of the Baikal region) // Earth Research from Space. 2022. No. 3. P. 66–83. (In Russian).
- Ivanova J.N., Nafigin I.O. Application of the Landsat-8 data set and the SRTM digital elevation model to predict gold-base metal mineralization in the central part of the Little Ural zone, Polar Urals // Earth Research from Space. 2023. № 6. P. 20–34. (In Russian).
- Ivanova J.N., Tyukova E.E. Decay structures in the ores of the Amphibolite occurrence (the Polar Urals) // II scientific. conf. "Geology at the Continental Margin". 2022. P. 143–145. (In Russian).
- Ivanova J.N. Prediction promising areas for gold ore mineralization based on the integration of geological, geophysical information and processing of the data set of the Earth remote sensing spacecraft Harmonized Landsat Sentinel-2 for the territory of the northern end of the eastern slope of the Polar Urals // Earth Research from Space. 2024 (in press). (In Russian).
- Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T. Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, UK, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Kenig V.V., Butakov K.V. Ore gold deposits the Novogodnee-Monto and the Petropavlovskoye are a new gold ore region in the Polar Urals // Razvedka i okhrana nedr. 2013. № 11. P. 22–24. (In Russian).
- Korotkov V.V. Geochemical and other technologies, methods and techniques for forecasting and searching for deposits (mainly "hidden" type) // Federal State Budgetary Institution "VIMS", 2023. 166 p. (In Russian).
- Kremenetsky A.A. Justification of search and prediction and audit works on gold within the Manukuyu-Varchatinsky ore cluster (the Polyarnaya Nadezhda, the Geokhimicheskoe, and the Blagodatnoye ore occurrence). Scale 1: 10,000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (In Russian).
- Kuznetsov N.B., Udoratina O.V., Andreichiev V.L. Paleozoic isotope rejuvenation of the pre-Uralide complexes and the problem of the Paleozoic evolution of the eastern margin of the East European continent, Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geol. 2000. No. 3(9). P. 15–19. (In Russian).
- Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S., Gavrilov R.Yu. Structural, geophysical and geochemical criteria for epithermal acid-sulfate gold mineralization on the example of the Svetloe ore field (Khabarovsk Territory) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2022. V. 333. No. 8. P. 60–72. (In Russian).
- Levchinskaya D.V., Yakich T.Yu., Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S. Hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime and types of gold mineralization in the Emi and Elena sites of the Svetloe epithermal ore field (Khabarovsk Territory) // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2021. V. 333. No. 10. P. 17–34. (In Russian).
- Loughlin W.P. Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M. et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masoud A.A., Koike K. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // Tectonophysics. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Mather P.M. Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.

- Maurer T.* How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method—a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101.
- Milovsky G.A., Denisova E.A., Yezhov A.A., Kalenkovich N.S.* Astring mineralization in the Sob'-Kharbey area (the Polar Urals) from Geospatial data // The study of the Earth from space. 2007. No. 6. P. 29–36. (In Russian).
- Perminov I.G., Grigoriev V.V., Kozlitin V.I. et al.* Prospecting and prospecting works for ore gold within the Sob-Kharbeyskaya area (YaNAO). Report on works 2006–2009 according to the State Contract No. 111–143 // Labytnangi, the Polar-Ural State Geological Enterprise, 2009. (In Russian).
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Review. 2012. V. 44. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. № 16. P. 23–46.
- Pryamonoosov A.P., Stepanov A.E., and et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (second edition). The Polar Ural series. Q-41–XII Sheet. Explanatory note. Salekhard: natural resources committee for the Yamalo-Nenets autonomous district. 2001. 231 p. (In Russian).
- Puchkov V.N., Ivanov K.S.* Tectonics of the northern Urals and Western Siberia: general history of development // Geotecto. 2020. No. 1. P. 41–61. (In Russian).
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41–XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014, 256 p. (In Russian).
- Shishkin M.A., Astapov A.P., Kabatov N.V., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1000000 (3rd gen.). The Ural series. Q41 – Vorkuta sheet: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. 541 p. (In Russian).
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V., et al.* Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // Geotectonics. 2018. V. 52. No. 5. P. 531–563.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin. 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319-7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // Indonesian Journ. of Geography. 2019. 51, 1. P. 31–41.
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B.* Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. V. 113(D23).
- Vikentiev I.V., Mansurov R.Kh., Ivanova Yu.N., and others.* Gold-porphyry Petropavlovskoe deposit (Polar Urals): geological position, mineralogy and conditions of formation Geology of ores. deposits // Geology of ore deposits. 2017. T. 59. No. 6. Pp. 501–541.
- Vikentyev I.V., Ivanova Y.N., Tyukova E.E., et al.* Porphyry-style Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals: geological position, mineralogy, and formation conditions // Geology of Ore Deposits. 2017. V. 59. № 6. P. 482–520.
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V.* Voikar volcano-plutonic belt (Polar Urals). Sverdlovsk: UC AN SSSR, 1984. 156 p. (In Russian).
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogram. and Rem. Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.
- Zylova L.I., Kazak A.P., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).