

УДК 550.8.05/528.88

СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ И ТИПИЗАЦИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ЗОН, ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ: ПЕРВЫЙ ОПЫТ СОВРЕМЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2021 г. И. В. Викентьев¹ *, Ю. Н. Иванова¹, И. О. Нафигин¹, академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 28.06.2021 г.

После доработки 07.07.2021 г.

Принято к публикации 08.07.2021 г.

Впервые для территории Урала на основе метода главных компонент был разработан подход к статистическому анализу дистанционных материалов космического аппарата Landsat 8. Он основан на оценке спектрального вклада минералогического индекса в главную компоненту с целью выявления особенностей глубинного строения Тоупугол-Ханмейшорского золоторудного района Полярного Урала. Установлено, что перспективные на золото площади приурочены к области сопряжения небольших кольцевых структур размером до 10 км, осложненной протяженными рудоконтролирующими разрывными нарушениями СВ- или СЗ-простираения, и на космических снимках выражены контрастными проявлениями индексов оксида железа (III) и в меньшей степени – оксида железа (II). Эти индексы рассматриваются как индикаторы развития минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза (лимонит и др.). Данный прогнозно-поисковый признак может быть использован при металлогеническом анализе детальных космических снимков частично закрытых регионов Арктической зоны.

Ключевые слова: мультиспектральные космические снимки, дистанционное зондирование, метод главных компонент, минералогический индекс, прогноз золотоносности

DOI: 10.31857/S2686739721100170

Проблема обеспеченности промышленности России высокотехнологичным минеральным сырьем с каждым годом обостряется вследствие неуклонного сокращения доли богатых руд. Число вновь открываемых месторождений снижается, так как большая часть выходящих на поверхность рудных тел уже обнаружена. Возникла необходимость развития новых методов прогнозирования “слепых”, расположенных под современной поверхностью месторождений. Важную роль в решении этого вопроса могут сыграть исследования Земли из космоса.

Современные материалы, полученные с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), обладают рядом преимуществ, таких как обзорность, детальность, повышенная глубинность, высокая информативность [1, 2]; соответствующие технологии отличаются экспрессностью и относительно низкой стоимостью. Спутники сейчас получают космические

снимки (КС), представляющие все более широкий комплекс мульти- и гиперспектральной информации. Анализ таких КС позволяет познать особенности глубинного строения изучаемой территории; выявлять скрытые разрывные нарушения; картировать границы структурно-формационных зон и породных комплексов; обнаруживать пространственное распределение минералов-индикаторов обстановок, характерных для различных геологических процессов. Весьма перспективно их применение в пустынях, полупустынях, горных областях [3–6] и особенно – арктических пространствах [7–10], где наземные работы осложнены климатическими условиями и зачастую большой мощностью четвертичных отложений.

Впервые для территории Урала на основе метода главных компонент (МГК) был разработан подход к статистическому анализу дистанционных материалов КА ДЗЗ Landsat 8, заключающийся в оценке спектрального вклада минералогического индекса в главную компоненту. Это позволило выявить в строении Тоупугол-Ханмейшорского района Полярного Урала новые структурные элементы, свидетельствующие о более

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

*E-mail: viken@igem.ru

широком распространении золоторудной минерализации.

Рудный район расположен на СВ-окончании Малоуральского вулканоплутонического пояса и представляет собой крупную асимметричную вулкано-тектоническую депрессию [11]. Изученная часть пояса в среднем палеозое представляла собой островную дугу, которая в раннем девоне сменилась окраинно-континентальным вулканическим поясом [12]. Здесь в Новогодненском рудном поле выявлены два золоторудных месторождения, приуроченных к контакту осадочно-вулканогенной тоупугольской толщи (S_2-D_1) базальт-андезибазальтовой формации и многофазного Собского гранитоидного батолита, сложенного породами собского (D_{1-2}) и конгорского (D_2) комплексов [13, 14].

Рудное поле ($\sim 8 \text{ км}^2$) представляет собой локальное вулкано-тектоническое поднятие, осложняющее вулкано-тектоническую депрессию, и приурочено к пересечению зон разрывов субмеридионального, СВ- и СЗ-простираций, которые ограничивают его и контролируют позицию золоторудных месторождений и проявлений. Разломы СВ-простираения обуславливают блоковое строение рудного района и определяют позицию интрузивных тел, даек и апофиз Собского плутона [14]. Все образования района прорваны дайками и силлами габбро-долеритов и лампрофиров мусюрского (малоханмейского) комплекса (C_1) [15]. В рудном поле известны два месторождения: Петропавловское (золото-порфировое, 26 т Au) и Новогоднее-Монто (Au-Fe-скарновое, 7 т Au) [14], а также ряд рудопроявлений – Западное, Караченцева, Карьерное и др. [16] – Fe-Au-скарнового, золото-кварцевого и золото-порфирового типов (рис. 1). Характерной чертой этих месторождений и проявлений является присутствие Au-Ag-теллуридов, а в составе руд – Cu, W, Co и многих рассеянных элементов [14, 17].

МЕТОДИКА

Подходы к выделению линеаментов на основе КС для территории Тоупугол-Ханмейшорского района и прилегающей территории приведены в работах [14, 18]. С целью дистанционного картирования зон гидротермального изменения были использованы мультиспектральные наборы данных. Первые применены для картирования групп гидротермальных минералов (карбонатные, глинистые, железистые), вторые подчеркивают их отличительные спектральные особенности. Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля гидротермально-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в

диапазоне датчика КА ДЗЗ. Для достижения данной цели мы получили дневное безоблачное изображение КА ДЗЗ Landsat-8 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф), сцена LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (path/tow 165/13) от 1 октября 2016 г., покрывающая территорию исследования, из Информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>). Так же была проведена радиометрическая и атмосферная коррекция космического изображения с целью калибровки сырых цифровых значений пикселей к отражающей способности дневной поверхности.

Выделение гидротермально-измененных зон по КС основывалось на применении двух подходов: метода отношения спектральных каналов (минералогические индексы) и МГК. Первый был использован для усиления спектральной особенности пикселя в мультиспектральных изображениях путем отношения спектрального отражения одного канала к другому [19]. Выбор подобных каналов производится на основе отражающей характеристики искомого минерала. При этом в числителе отношения должен располагаться канал, характеризующий наибольшую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе – наименьшую. В результате искомым минерал (или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении (красный цвет на рис. 2 а–г).

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА Landsat-8 было разработано несколько минералогических индексов [9]: 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 могут рассматриваться 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.

Второй метод (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 [20]. Данный метод был применен к анализу ранее полученных минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы. Подобный подход позволяет статистически оценить надежность простран-

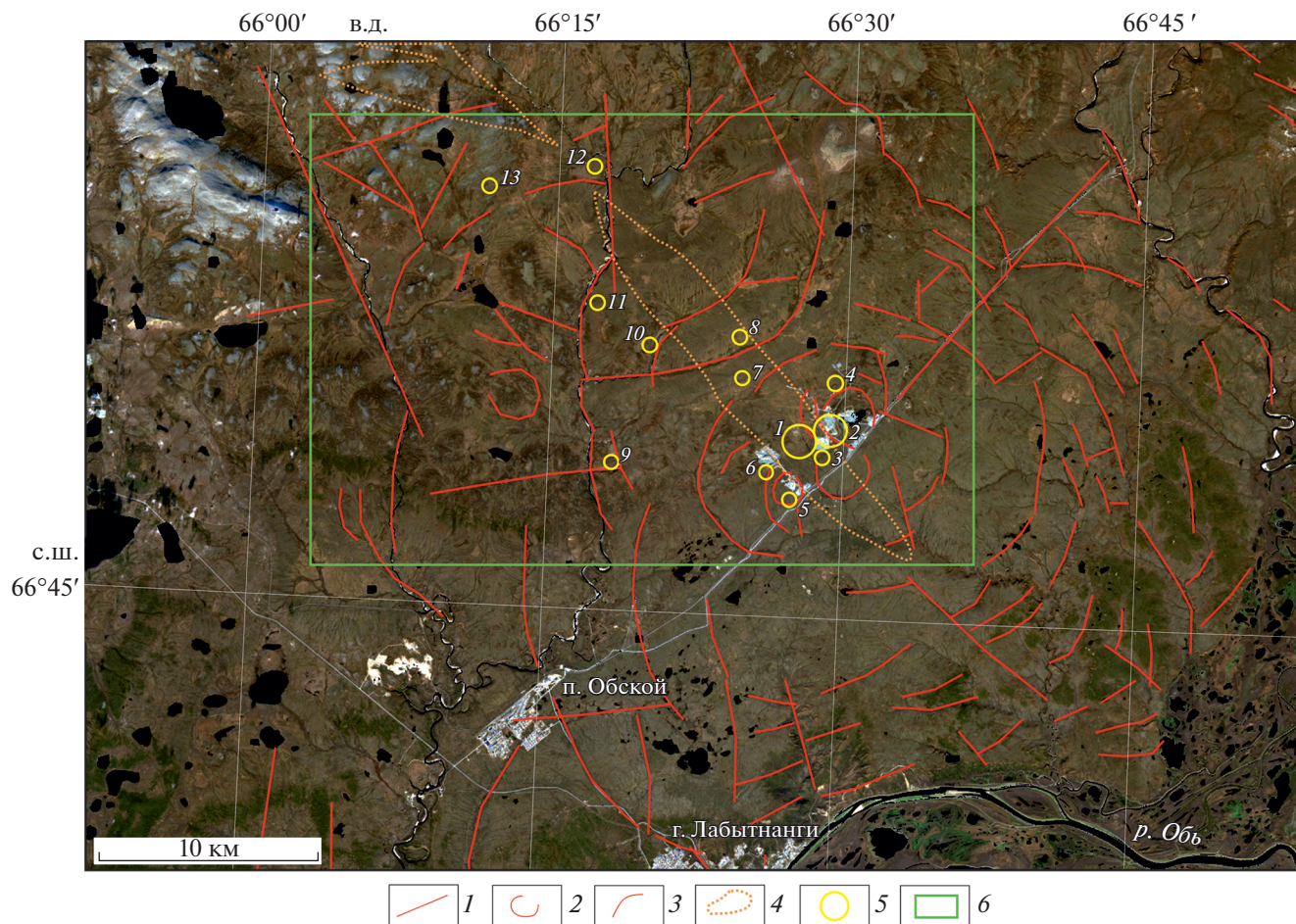


Рис. 1. Морфоструктурная карта Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории, наложенная на КС Landsat 8. 1–3 – линейменты, выявленные в ходе анализа КС: 1 – 1-го порядка, 2 – кольцевые, 3 – дуговые; 4 – зона березитизации, вынесенная с геологической карты [16]; 5 – рудопроявления (по данным [16]) и месторождения изучаемой территории: 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); 6 – границы: Тоупугол-Ханмейшорского рудного района; 7 – контур, соответствующий рис. 2 и 3.

ственного распределения соответствующих вторичных минералов в исследуемом районе.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе и прилегающей территории выделена Новогодненская палеовулканическая структура 2-го порядка диаметром около 10 км, отвечающая малоглубинному очагу (4–5 км), с которым, по-видимому,

было связано образование месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто. Ее осложняют линейменты СВ- и СЗ-простираения. Кольцевые и дуговые структуры более низкого порядка связаны с субвулканическими телами порфировых диоритов (рис. 3).

При анализе КС были выделены 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов и раздельно показанных на фрагментах рис. 2 (а–г). Исследователями ВСЕГЕИ [16] на этой площади (лист Q-42-VII Салехард, масштаб 1:200000) 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 в рудных интервалах более 1 г/т. Данная зона слабо отражается в полученных

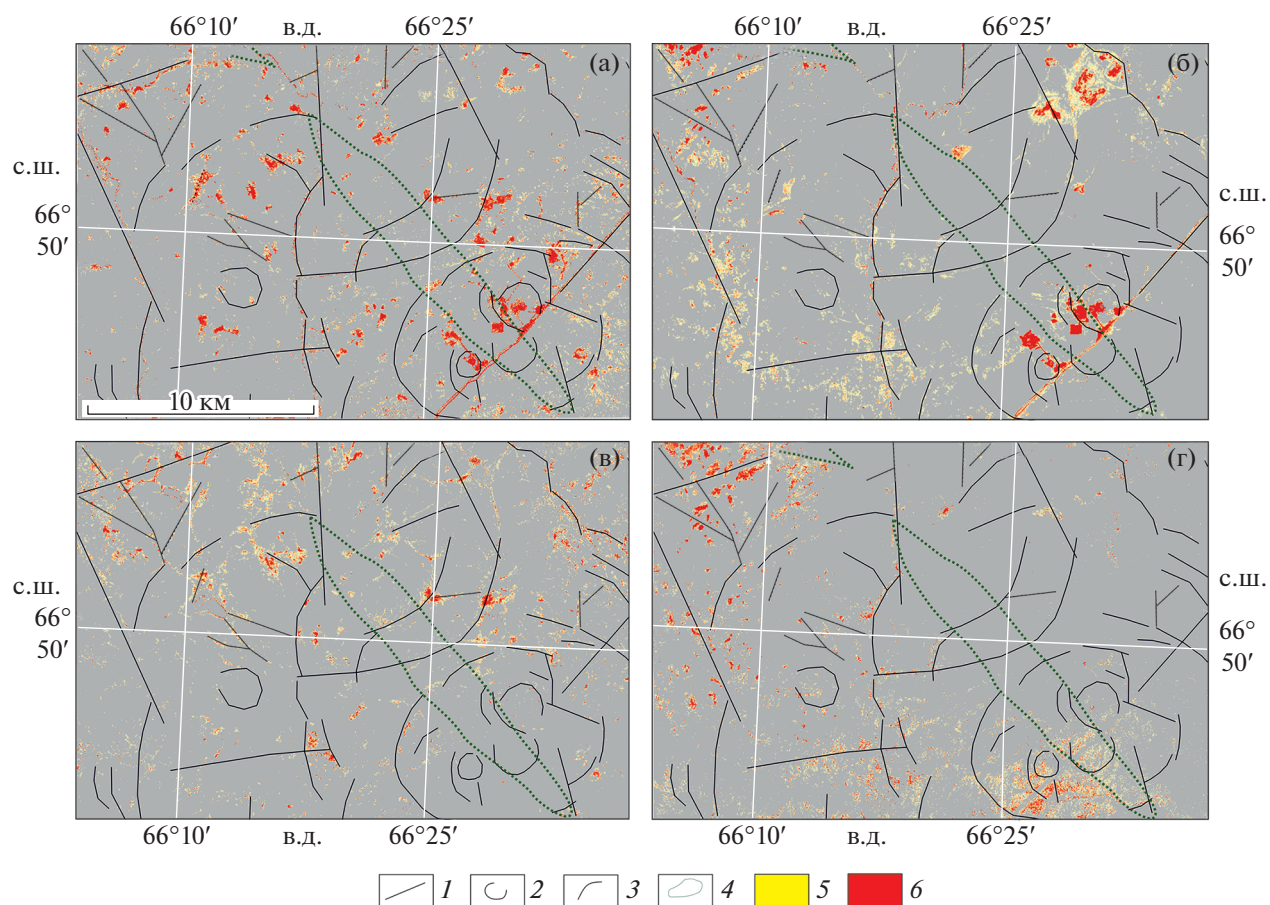


Рис. 2. Карта отдешифрованных по КС гидротермальных изменений Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории. а–г – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов: а – гидроксил- (Al–ОН, Mg–ОН) и карбонат-содержащих, б – оксидов трехвалентного железа (гематит), в – оксидов и гидроксидов железа (лимонит), г – оксидов двухвалентного железа (магнетит). 1–3 – разрывные нарушения, выявленные в ходе анализа КС: 1 – радиальные 1-го порядка; 2 – кольцевые; 3 – дуговые; 4–6 – метасоматические изменения: 4 – зона березитизации, вынесенная с геологической карты [16], 5–6 – концентрации индикаторных групп вторичных минералов: минимальные (5) и максимальные (6).

дистанционных результатах, что обусловлено большой мощностью четвертичных отложений, которая здесь достигает 93 м [16]. В ЮВ-части зоны, где рыхлые отложения хотя и присутствуют, но сокращаются в мощности 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 дневной поверхности.

Известные золото-сульфидно-кварцевые, золото-железо-скарновые и золото-порфировые месторождения и рудопроявления района связаны с субвулканическими телами порфировых диоритов [14, 16]. Они тяготеют к центральной части Новогодненского палеовулкана и контролируются узлами пересечения концентрических и (или) дуговых разломов с сопряженными с ними радиальными разрывными нарушениями 1-го порядка СВ- и СЗ-простираения, а также с участками

сосредоточения мелких кольцевых структур и зонами повышенных значений индекса оксида железа (III) (рис. 2б). При этом последние отражают участки возможного развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих пород и являются наиболее перспективными для выявления золоторудной минерализации. Поэтому мы считаем первоочередными для выявления золоторудных объектов участки, имеющие данные признаки.

В Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе наиболее высокими концентрациями индекса оксида железа (III) выделяется участок с известными золоторудными месторождениями Петропавловское и Новогоднее-Монто. Здесь распространены вулканические породы среднего и основного состава тоупугольской толщи – базальты, андезибазальты, реже андезиты. На них наложены продукты зачастую совмещенных в простран-

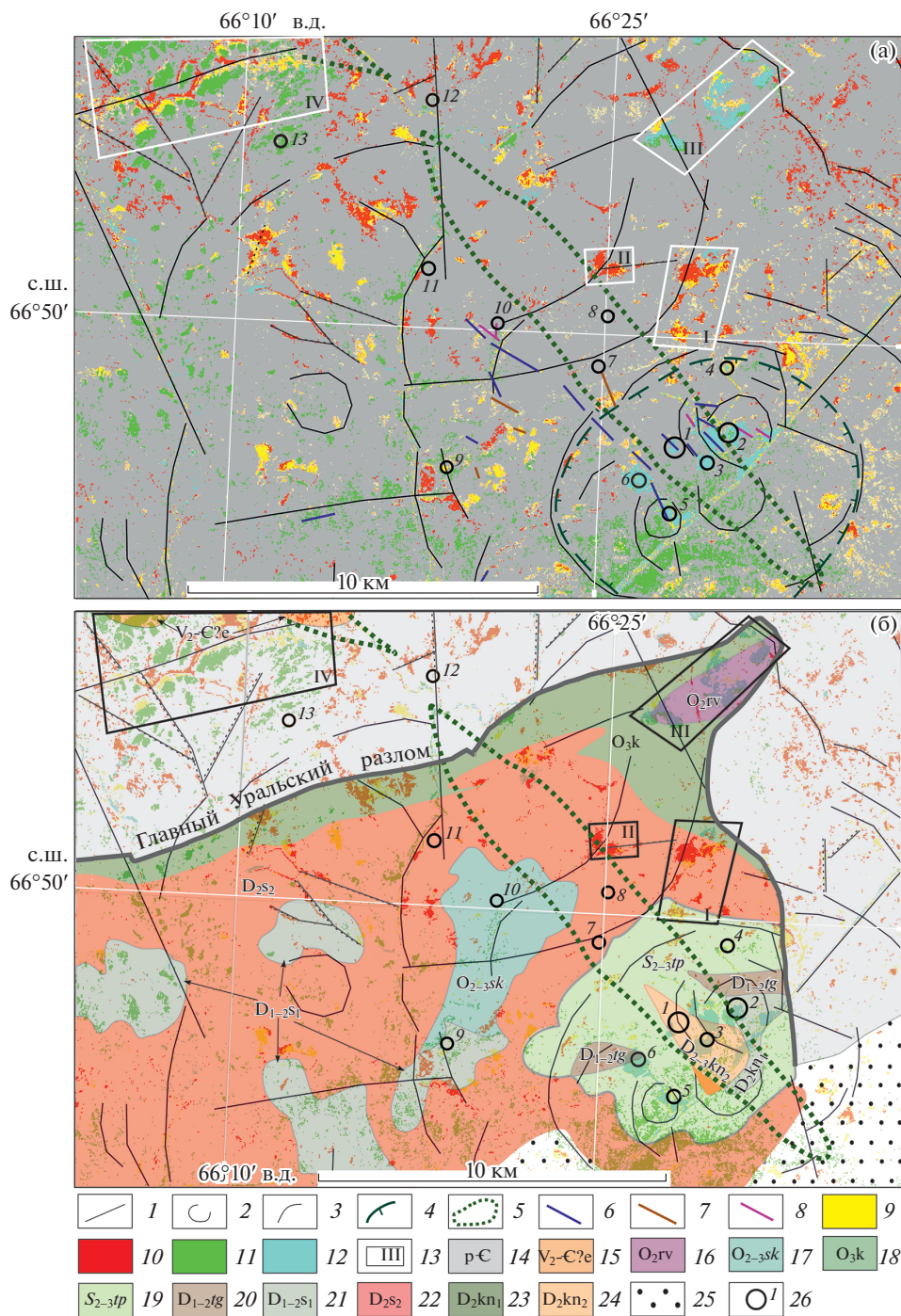


Рис. 3. Карта гидротермальных изменений Топуугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории. а – площади развития гидротермально-метасоматических пород по материалам Д33, б – они же, вынесенные на геологическую карту (упрощена по [16]). 1–4 – линейменты и другие структуры, выявленные в ходе анализа КС: 1 – радиальные 1-го порядка, 2 – кольцевые, 3 – дуговые, 4 – Новогодненская палеовулканическая структура; 5 – зона березитизации, вынесенная с геологической карты [16]; 6–8 – дайки, связанные с типами рудной минерализации: 6 – золото-сульфидно-кварцевым (C_1); 7 – золото-сульфидно-кварцевым (D_{2-3}); 8 – золото-железо-скарновым (D_2); 9–12 – вторичные изменения: 9 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 10 – гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы; 11 – оксиды двухвалентного железа (магнетит); 12 – оксиды трехвалентного железа (гематит); 13 – перспективные для выявления золоторудной минерализации территории (номера I–IV на карте – см. пояснения в тексте); 14–24 – магматические комплексы и толщи: 14 – докембрийские породы Собского поднятия (гранито-гнейсы и др.); 15 – евяганский комплекс; 16–24 – образования Войкарской зоны: 16 – дунит-гарбушитовый райизко-войкарский комплекс, 17 – соколинская толща, 18 – дунит-вертлит-клинопироксенит-габбровый кэршорский комплекс, 19 – топугольская толща, 20 – топугольгартская толща, 21 – первая фаза собского комплекса, 22 – вторая фаза собского комплекса, 23 – первая фаза конгорского комплекса, 24 – вторая фаза конгорского комплекса; 25 – осадочный чехол MZ–KZ-отложений Западно-Сибирской плиты; 26 – рудопоявления и месторождения (см. рис. 1).

стве разновозрастных процессов скарнирования, березитизации и окварцевания. Эти метасоматические проявления связаны в основном с дайками кварцевых монцоидорит-порфириров и кварцевых габбро конгорского комплекса первой и второй фаз внедрения (D_2k_{n1} , D_2k_{n2}), а также пропилитизации, которой подверглись плагиограниты и другие гранитоиды поздней фазы собского комплекса (D_2s_3). Последние формировали штокверки с мельчайшими прожилками эпидота, хлорита, пренита, карбоната и кварца. С зонами пропилитизации связано развитие мелкой вкрапленности сульфидов Cu и Fe, по которым в зоне гипергенеза развиваются продукты окисления сульфидов бурых, зеленых и синих оттенков видимой части спектра.

Учитывая геологические особенности локализации рудных объектов и данные обработки КС, был предложен усовершенствованный комплекс поисковых признаков. Выделены 4 наиболее перспективных участка, которые на схемах дешифрирования КС отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов (рис. 3).

Перспективные участки I и II локализованы вблизи Новогодненской палеовулканической структуры (рис. 3). Они имеют площади ~ 1.2 и 0.25 км² соответственно и расположены вдоль дуговых структур 1-го порядка, являющихся, вероятно, рудоконтролирующими. Сложены они преимущественно породами собского габбро-тоналитового комплекса второй фазы внедрения (D_2s_2). Согласно реконструкциям [14], они относятся к удаленной и склоновой фациям Новогодненского палеовулкана и входят в состав единой порфирово-гидротермальной системы одноименного рудного поля. Породы этих фаций представлены тонким переслаиванием осадочных пачек (петрофизический барьер), наличием карбонатных и углеродсодержащих разностей (геохимический барьер), благоприятными для рудоотложения, и характеризуются умеренными температурами проявленных в них гидротермальных процессов. Рудная минерализация данных перспективных территорий пространственно близка к зоне региональной березитизации и, вероятнее всего, выражена в развитии околотрецининых кварц-карбонат-слюдистых (березитоподобных) метасоматитов и сопровождающих их маломощных кварцевых и карбонат-кварцевых жил. Эти площади могут быть перспективны на выявление объектов золото-сульфидно-кварцевого типа.

Перспективный участок III площадью 1.66 км² расположен на северо-востоке территории. Он также имеет повышенные содержания индекса оксида железа (III), но относится к породам райизко-войкарского дунит-гарцбургитового

комплекса (O_2gv). Он локализован на СВ-окончании Войкарской зоны и сложен преимущественно породами ультраосновного и основного состава, перспективными на выявление месторождений золото-сульфидно-кварцевого и Au-Fe-скарнового типа, хромитов, Fe-Ti-V-руд и медной минерализации.

Рудоперспективный участок IV находится на северо-западе изучаемой области, имеет площадь 2.34 км² и связан с наиболее высокими концентрациями индекса оксида железа (II). Он локализован в кислых докембрийских породах евьюганского метагранитового комплекса, затронутых процессами калипшпатизации, окварцевания и альбитизации, которые обусловили возможность прогнозирования здесь черносланцевого и золото-редкометалльно-молибденового типов минерализации, которые являются характерными для Собского поднятия [11, 16]. Участки III и IV расположены вдоль и на продолжении протяженных зон СВ-простираения, вероятно, так же связанными с рудоконтролирующими разрывными структурами.

ВЫВОДЫ

Дистанционные методы исследований, в данном случае многоспектральные космоснимки высокого разрешения, дают возможность выявлять структурную и вещественную неоднородность Земной коры. Структурные неоднородности, общая тектоническая нарушенность позволяют картировать разрывные зоны, выраженные на Полярном Урале в виде кольцевых и дуговых морфоструктур (кальдерные разломы, протоматическая трещиноватость, кольцевые и конические дайки) и линейных зон (радиальные дайки и разрывы, длительно развивающиеся продольные швы тектоно-метаморфической природы).

В результате применения в Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе разработанного подхода, заключающегося в оценке спектрального вклада минералогического индекса в главную компоненту, выделены ранее неизвестные здесь структурные элементы. Зоны размером в первые км, отличающиеся по аномальному спектральному набору, приурочены к периферическим частям крупной кольцевой структуры, реконструируемой как крупный долгоживущий рудно-магматический центр. Последний активно функционировал в период первая половина силура—середина девона, что обеспечило его высокую рудопродуктивность. Кольцевые и радиальные разрывы являются положительным признаком возможного оруденения. Его зоны, в том числе, скрытые под чехлом рыхлых отложений, на КС выражены контрастными проявлениями индексов оксида железа (III) и в меньшей степени — оксида железа

(II). Эти индексы рассматриваются как индикаторы минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза (лимонит и др.).

Разработанный подход может быть рекомендован для использования при дальнейшем металлогеническом анализе территорий по материалам детальных космических съемок для частично закрытых регионов Арктической зоны. Установлено, что развитые здесь ореолы окolorудных изменений проявляются на КС при мощности чехла рыхлых отложений до 6 м.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 18-05-70041, 20-05-00849 и в рамках Госзадания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г.* Космическая геоинформатика // Перспективы науки и образования. 2016. № 1 (19). С. 17–21.
2. *Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А.* Прогнозно-поисковая модель эпитеpмальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край // Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 84–92.
3. *Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and Mineral Information Extraction for Gold Exploration Using ASTER Data in the South Chocolate Mountains (California) // J. Photogramm. Remote Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.
4. *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.
5. *Amer R., Kusky T., El Mezayen A.* Remote Sensing Detection of Gold Related Alteration Zones of Um Rus Area, Central Eastern Desert of Egypt // Adv. Space Res. 2012. V. 49. P. 121–134.
6. *Kumar C., Chatterjee S., Oommen T.* Mapping Hydrothermal Alteration Minerals Using High-resolution AVIRIS-NG Hyperspectral Data in the Hutti-Maski Gold Deposit Area, India // Int. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
7. *Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. и др.* Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.
8. *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.
9. *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.
10. *Pour A.M., Park Tae-Yoon S., Park Y., et al.* Landsat-8, Advanced Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // Rem. Sens. 2019. 11 (20). 2430.
11. Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала. Под ред. А.Ф. Морозова, О.В. Петрова, А.Н. Мельгунова. СПб: ВСЕГЕИ, 2010. 274 с.
12. *Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В., Варламов Д.А., Хоуриган Дж.К., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Соболева Д.А.* Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
13. *Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S.* Geology, Mineralization, Stable Isotope Geochemistry, and Fluid Inclusion Characteristics of the Novogodnee-Monto Oxidized Au-(Cu) Skarn and Porphyry Deposit, Polar Ural, Russia. 2013 // Miner. Deposita. 48 (5). P. 603–627.
14. *Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др.* Золото-порфиpовое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геол. руд. месторожд. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
15. *Соболев И.Д., Викентьев И.В., Травин А.В., Бортников Н.С.* Каменноугольный магматизм Полярного Урала // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 2. С. 22–28.
16. *Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Об. записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
17. *Викентьев И.В., Абрамова В.Д., Иванова Ю.Н. и др.* Микропримеси в пирите золото-порфиpового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // ДАН. 2016. Т. 470. № 3. С. 326–330.
18. *Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В.* Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Тоупугол-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76.
19. *Mather P.M.* Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
20. *Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57. P. 1163–1169.

STRUCTURAL POSITION AND TYPIFICATION OF ALTERATION ZONES, POLAR URALS: THE FIRST EXPERIENCE OF MODERN SPACE SENSING OF THE EARTH

I. V. Vikentyev^{a, #}, Yu. N. Ivanova^a, I. O. Nafigin^a, and Academician of the RAS N. S. Bortnikov^a

*^a Institute of Geology of Ore deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[#]E-mail: viken@igem.ru

For the first time, an approach to the statistical analysis of remote materials of the Landsat 8 spacecraft was developed for the territory of the Urals on the basis of the principal components method. It is based on the assessment of the spectral contribution of the mineralogical index to the principal component in order to identify the features of the deep structure of the Toupugol-Khanmeyskor gold ore region of the Polar Urals. It was found that the promising areas for gold are confined to the interface area of small ring structures up to 10 km in size, complicated by extensive ore – controlling discontinuous disturbances of the NE or NW strike, and are expressed on the satellite images by contrasting manifestations of the iron (III) oxide index and to a lesser extent – the iron (II) oxide index. These indexes are considered as indicators of the occurrence of hydrothermal minerals and products of their hypergenesis (limonite, etc.). This predictive search feature can be used in the metallogenic analysis of detailed satellite images of partially closed regions of the Arctic zone.

Keywords: multi- and hyperspectral satellite images, remote sensing, principal component analysis, mineralogical index, prognosis of gold mineralization