

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ НАБОРА ДАННЫХ LANDSAT-8 И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА SRTM ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОЛОТО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАЛОУРАЛЬСКОЙ ЗОНЫ, ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ

© 2023 г. Ю. Н. Иванова^{a, b, *}, И. О. Нафигин^a

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

Впервые для центральной части Малоуральской зоны Полярного Урала применен новый подход к обработке данных дистанционного зондирования Земли, полученных космическим аппаратом Landsat-8. Он заключается в интеграции карт распределения гидротермальных изменений и схемы плотности линеаментов, созданных на основе результатов статистической обработки данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission). Работа проведена с целью выявить морфологические признаки и закономерности, особенности глубинного строения и выделить площади, перспективные на золото-полиметаллический тип минерализации, на изучаемой территории. В результате исследования установлено, что перспективные на золото-полиметаллический тип минерализации площади в центральной части Малоуральской зоны локализованы вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующей рудную минерализацию, и в пределах крупных морфоструктур, осложненных радиальными разрывными нарушениями 1-го порядка СВ и СЗ протяженностью до 30 км, а также областей с повышенными значениями индексов оксидов железа (II и III), реже гидроксид- (Al–OH, Mg–OH) и карбонат-содержащих минералов.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, метод главных компонент, цифровая модель рельефа, линеаменты, разрывные нарушения, морфоструктурная карта, Полярный Урал, Landsat-8, карта плотности линеаментов

DOI: 10.31857/S0205961423050056, EDN: XEABPE

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия стали широко использоваться материалы мульти- и гиперспектральных космических снимков (КС) с высоким пространственным разрешением, полученных с помощью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Данные спутниковых изображений в геологии – это мощный и эффективный инструмент для извлечения ценной информации на начальных этапах геолого-разведочных работ с целью обнаружения скрытых разрывных нарушений, распознавания гидротермально измененных горных пород, рудной минерализации и др. (например, Kumar et al., 2020; Pour et al., 2021).

Центральная часть Малоуральской зоны (ЦЧМЗ) является перспективной для обнаружения золото-полиметаллического типа минерали-

зации. Ранее для этой площади уже был проведен морфоструктурный анализ и морфометрическое моделирование (Иванова и др., 2020). Для Манюкую-Варчатинского рудного узла, входящего в ЦЧМЗ, была составлена схема плотности линеаментов (ручной и автоматический способы), морфоструктурная карта и выделены границы участков, перспективных на полиметаллический тип минерализации (Иванова, Нафигин, 2023) (рис. 1). Полученные закономерности и новые прогнозно-поисковые признаки (геологические, морфологические, геохимические) на полиметаллический тип минерализации могут быть использованы в качестве вспомогательного средства для разведки полезных ископаемых (ПИ) в других районах Полярного Урала и северных широтах.

Цель работы – выявить морфологические признаки и закономерности, особенности глу-

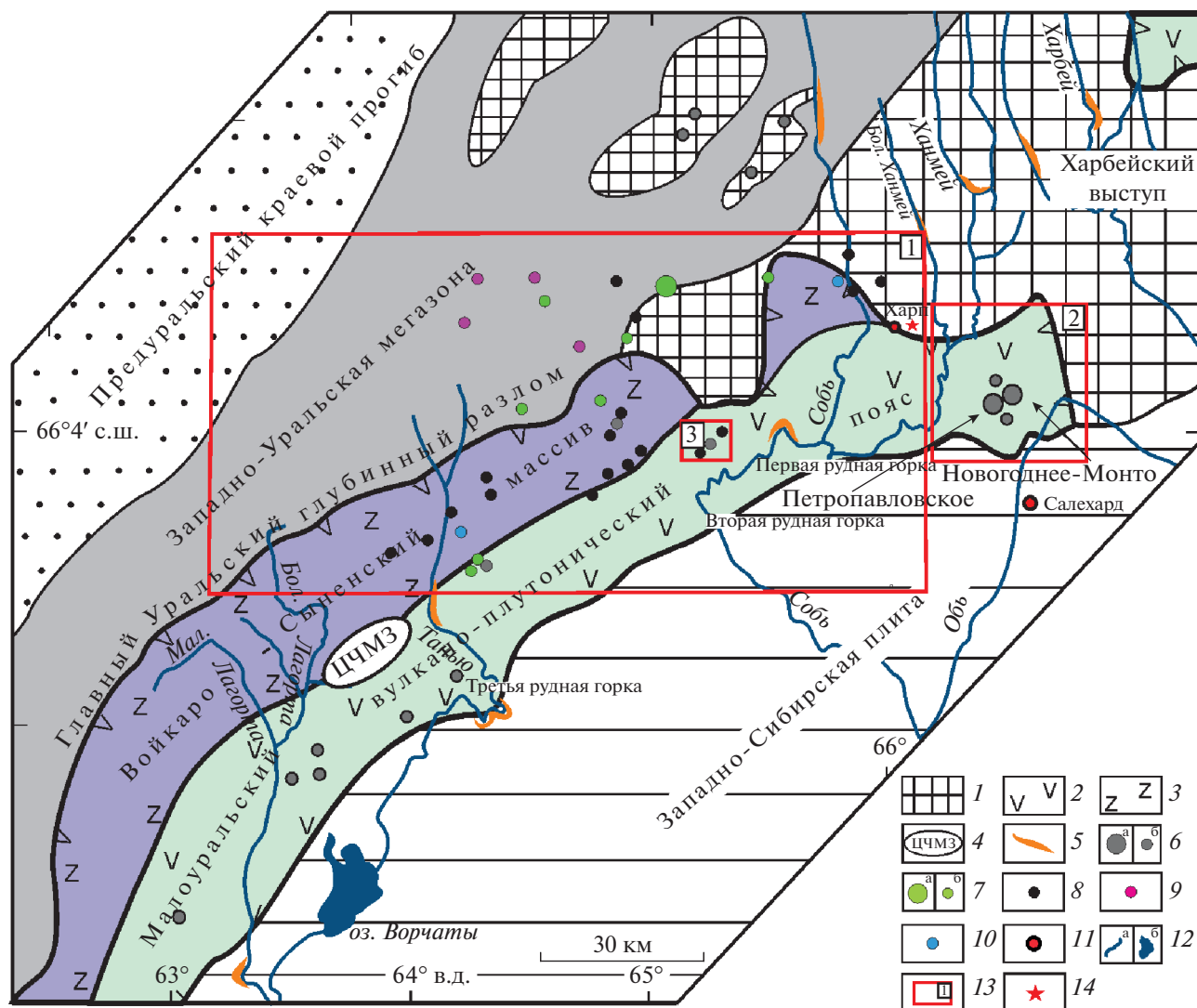


Рис. 1. Структурная основа по (Черняев и др., 2005) с изменениями: 1 – Центрально-Уральская мегазона, 2 – базальт-андезитовый комплекс, 3 – офиолиты, 4 – ЦЧМЗ, 5 – россыпи золота; 6–7 – месторождения (а), рудопроявления (б): 6 – золоторудные и золотосодержащие; 7 – Cu–Zn–Mo; 8–10 – рудопроявления: 8 – Fe–Ti–V–Cu; 9 – Mo–Cu, 10 – Mo, 11 – населенные пункты; 12 – основные реки (а) и озеро (б), 13 – границы: района работ (1), Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (2), Манюкую-Варчатинского рудного узла (3), 14 – рудопроявление Амфиболитовое и место проведения предыдущих полевых работ.

бинного строения и выделить площади перспективные на золото-полиметаллический тип минерализации на территории ЦЧМЗ на основе статистического анализа дистанционных материалов КА ДЗЗ Landsat-8.

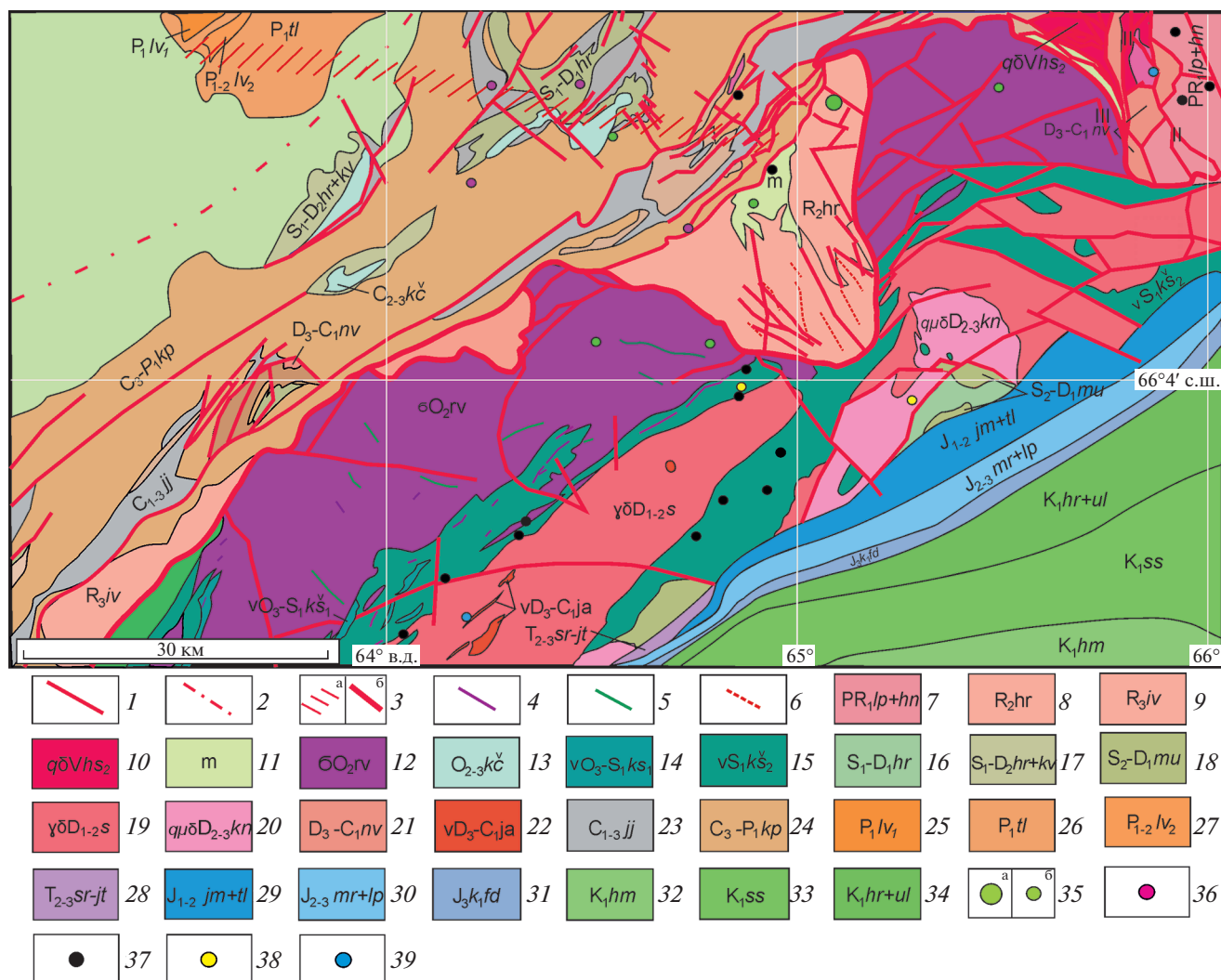
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Более подробное геологическое описание ЦЧМЗ, Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающих территорий можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Шишкин и др., 2007, Estrada et al., 2012, Кременецкий, 2012, Зылева и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Викентьев и др., 2017, Соболев и др., 2018 и др.). Тектоническая

схема Уральского складчатого пояса представлена на рис. 1.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

КС КА Landsat-8. В работе была использована безоблачная дневная сцена КА Landsat-8 LC08_L1TP_166013_20160821_20170322_01_T1 уровня обработки 1Т (с поправкой на рельеф), полученная 21.08.2016 г. в 07:11:49 утра. Данные космической съемки были загружены из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>).



Предварительная обработка КС включала в себя радиометрическую калибровку, атмосферную и топографическую коррекцию спутниковых данных. Радиометрическая калибровка данных Landsat-8 является преобразованием необработанных цифровых значений яркости (DN), полученных датчиками спутника, в значения освещенности. Она необходима для обеспечения точности и согласованности данных между разнообразными датчиками и временными периодами (Roy et al., 2014).

Атмосферная коррекция состояла из удаления эффектов атмосферных помех из спутниковых данных, которые могут стать причиной ошибок при составлении минералогических схем и повлиять на значения отражательной способности различных минералов. Атмосферная коррекция данных Landsat-8 была выполнена с помощью алгоритма Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) (Zhang et al., 2017) и реализована в программном комплексе ENVI.

FLAASH корректирует данные с учетом эффектов атмосферного рассеяния, а также обеспечивает значение отражения в пикселе, которое можно использовать для геологического картирования (Lyapustin et al., 2003).

Топографическая коррекция включала устранение влияния рельефа местности на значения отражательной способности спутниковых данных. Эффект влияния рельефа может вызвать изменения в отражательной способности из-за различий в освещенности и затененности, что влияет на результаты геолого-минералогического картирования. Данные Landsat-8 топографически скорректированы с помощью алгоритма Cosine of Solar Zenith Angle (COSZ) в программном комплексе ENVI. Данный алгоритм корректирует топографическое влияние на значения отражательной способности, учитывая зенитное расстояние Солнца, уклон и ориентацию местности (Teillet et al., 1982).

Рис. 2. Геологическая карта ЦЧМЗ по (Шишкин и др., 2007) упрощенная. Условные обозначения: 1–3 – достоверные разрывные нарушения: 1 – главные, выходящие на поверхность, 2 – скрытые под вышележащими образованиями, 3 – отражающие разломы фундамента и контролирующие эндогенное оруденение (Mn, Cu, Zn, Pb) в палеозойских образованиях (а), зона Главного Уральского надвига (ГУН), перспективная на гидротермально-метасоматическую Ni и Au минерализацию (б), 4–6 – дайки: 4 – тела габбро, габброноритов, диоритов, габбро второй фазы Кэшорского комплекса, 5 – пироксениты и габброиды Кэшорского комплекса, содержащие Au, Pb, Cu оруденение волковского типа и ванадийсодержащие Ti–Mg оруденение; 6 – плагиограниты Кыквошорского комплекса, ивтысьшорской свиты, 7 – лаптпоганская и ханмейхойская свиты, включающие альбитовые амфиболиты, гнейсы, линзы мраморов и железистых кварцитов, вмещающие Cu минерализацию кварцево-жильного типа, благоприятная среда для гидротермально-метасоматической Mo минерализации, 8 – хараматалоуская серия с чередованием графито-кварцевых сланцев, кварцитосланцев, слюдястых сланцев, кварцитов, эпидот-альбитовых амфиболитов, хлорит-альбитовых сланцев, гондитов, благоприятная среда для локализации Au–Pt минерализации черносланцевой формации, 9 – ивтысьшорская свита, включающая вулканы базальт-плагиоориолитовой формации, переслоенные с туфами, туфогенно-осадочными и графитоидно-кварцевыми сланцами, прослоями и линзами мраморизованных известняков, метасоматические измененные вулканические свиты вмещают Cu-полиметаллическое оруденение колчеданного типа, 10 – габброграно-диоритовый Хорбей-Собский комплекс, связанный с месторождениями и проявлениями молибденитового и редкоземельного оруденения, 11 – Кемпирсайско-Войкарский комплекс тектонитов, содержащий глыбы полимиктового состава в серпентинитовом матриксе, глаукофаниты, бластомилониты, бластокатаклазиты, включающие проявления сульфидных Ni руд, 12 – дунит-гарбуцитовый Райизско-Войкарский комплекс, вмещающий залежи высокохромистых и высокоглиноземистых хромитовых руд, 13 – качамыльская свита с известковистыми песчаниками, алевролитами с линзами алевритовых известняков, содержащая сингенетическое гидротермально-осадочное Fe–Mn и полиметаллическое оруденение парнокского типа, 14–15 – дунити-верлит-клинопероксенит-габбровый Кэшорский комплекс первой фазы, вмещающий тела клинопероксенитов, вебстеритов, дунитов, верлитов, перцолитов, железистых дунитов (14); вторая фаза с габбро, габброноритами, габброидами, диоритами, дайками габбро (15), 16 – харотская свита с углисто-глинисто-кремнистыми, углисто-глинистыми сланцами, фтанитами, пачками известняков, 17 – объединенные харотская и косвожская свиты, состоящие из углисто-глинисто-кремнистых, углисто-глинистых сланцев, фтанитов, пачек известняков, зеленых алевритов, глинистых сланцев с линзочками конкреционных карбонатов и единичных пластов базальтов, 18 – малоуральская свита, включающая туфы базальтов, андезитобазальты, базальты, дациты, прослои туфопесчаников, туффиты с линзами рифтогенных известняков, благоприятная среда для локализации скарново-магнетитового и Cu-порфиорового оруденения; 19 – диорит-тоналит-плагиогранитовый Собский комплекс, состоящий из гранодиоритов, тоналитов и плагиогранитов, с внедрением интрузий связано формирование Cu–Fe-скарнового и Au и Cu-порфиорового оруденения; 20 – монцогранодиоритовый Конгорский комплекс с кварцевыми монцодиоритами, гранодиоритами, диоритами, с внедрением комплекса связано Cu–Mo оруденение Cu-порфиоровой формации, 21 – няньворгинская свита, включающая алевроглинистые, глинисто-кремнистые, углисто-кремнистые сланцы и фтаниты, благоприятная среда для локализации сингенетического Mn оруденения, 22 – гранитовый плутонический Янаславский комплекс, содержащий биотит-роговообманковые граниты, лейкограниты и аляскиты, с образованиями комплекса связано Cu–Mo оруденение, 23 – яйюская свита, состоящая из граувакков, полимиктовых песчаников, известковистых алевролитов, глинистых сланцев, прослоев известняков и доломитов, отложения свиты вмещают стратиформное Ba, Mn и фосфоритовое оруденение, 24 – плутонический плагиогранитовый Погурейский комплекс, 25 – нижняя (аячьанская) подсвета левворкутской свиты Воркутинской серии с переслаиванием известковистых песчаников, алевролитов, аргиллитов, 26 – талатинская свита, включающая переслаивание алевролитов, алевритистых аргиллитов с редкими прослоями полимиктовых песчаников, 27 – нерасчлененная левворкутинская свита с переслаиванием известковистых песчаников, алевролитов, аргиллитов, 28 – триасовая система, средний отдел, ладинский ярус – верхний отдел, карнийский-рэтский ярусы, нерасчлененные саранпаульская, сембинская и ятринская свиты, включающие глины, алевролиты, пески, песчаники, гравелиты, конгломераты, линзы бокситов, пласты бурых углей, 29 – средняя юра, нижний-средний отдел, батский ярус, объединенные яныманьская и тольинская свиты с песком, гравием, галечником, конгломератами и бурыми углями, 30 – юрская система, батский ярус – верхняя юра, нижнетитонский подъярус, объединенные маурынская и лопсинская свиты, содержащие глины, аргиллиты, пески, пласты бурых углей, 31 – верхняя юра, титонский ярус – нижний мел, нижеберриасский подъярус, федоровская свита, содержащая глауконито-кварцевые, иногда фосфатосодержащие, зеленые, зеленовато-серые с оолитами шамозита, с гравием, конкрециями алевролиты и песчаники, 32 – альбский ярус, ханты-мансийская свита, включающая темно-серые алевролитовые глины с прослоями алевритов, глинистых известняков и сидеритов, режескоров, 33 – готеривский-аптский ярусы, северососьвинской свиты, содержащая пески, алевролиты и алевриты уплотненные, чередующиеся с глинами серыми, темно-серыми и буроватыми, пласты бурых углей, 34 – берриасский ярус, верхний подъярус – готеривский ярус, харосоймкая и уласынская свиты объединенные, содержащие аргиллитоподобные и алевритистые глин, прослои алевролитов, глинистых известняков и песчаников, 35–40 – месторождения и рудопроявления: 35 – Cu–Zn–Mo месторождения (а), рудопроявления (б), 36–39 – рудопроявления: 36 – Mo–Cu, 37 – Fe–Ti–V–Cu, 38 – Au, 39 – Mo.

Для проведения линеаментного анализа использована цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM – The Shuttle Radar Topography Mission (Farr et al., 2007), охватывающая исследуемую территорию. Данные SRTM получены из системы данных наблюдения Земли (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).

Геологическая информация представлена в виде геологической карты и карты ПИ ЦЧМЗ

масштаба 1 : 200000, которые составлены в рамках госзадания ВСЕГЕИ в 2005 г. (Шишкин и др., 2007) (рис. 2).

Полевые работы проводились в ходе нескольких экспедиций ИГЕМ РАН (летние сезоны 2019 и 2021 гг.) на исследуемой территории (см. рис. 1).

Для полевых заверочных работ использовалась система глобального позиционирования (GPS) Garmin GPSmap 62s с целью определения точных

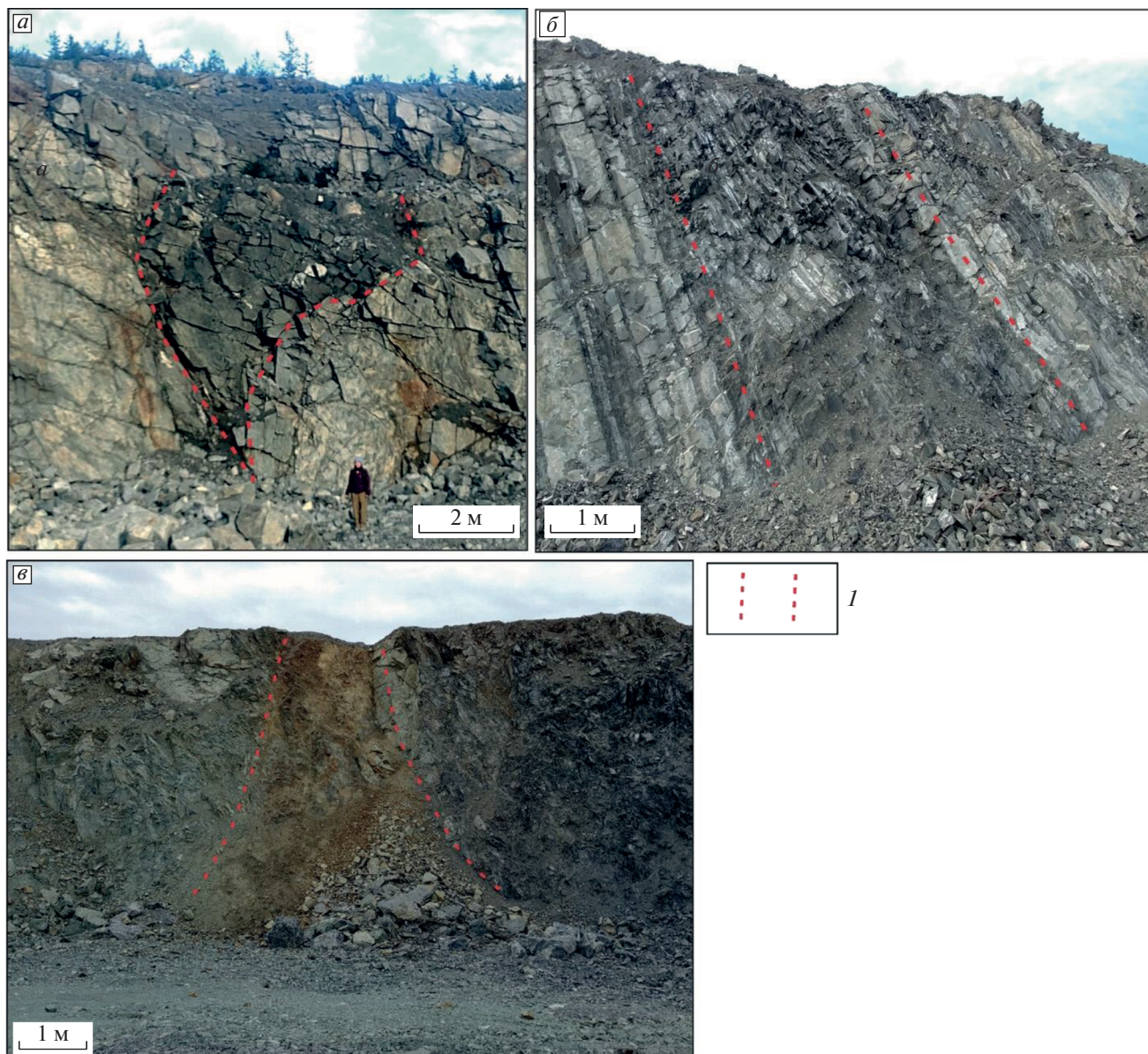


Рис. 3. Примеры разломов, вмещающих и интрузивных пород и минерализации (*а–в*) рудопроявления Амфиболитовое (см. рис. 1), заверенных в ходе полевых работ: *а* – дайка пироксенитов (?) в кварцевых диоритах, *б* – зона дробления и расланцевания в слоистой толще, *в* – зона оруденения. Условные обозначения: 1 – границы: даек (*а, б*) и зона оруденения (*в*).

местоположений структурных элементов. Проведена полевая фотосъемка обнаженных разломов, вмещающих и интрузивных пород, минерализации, чтобы подтвердить их надежность наблюдения в локальном масштабе (рис. 3, *а, б, в*).

Закартированные разломные структуры хорошо коррелируют с тектоническими нарушениями, отраженными как на геологической карте, так и на структурных схемах предшественников.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаменты – это прямые или приблизительно прямолинейные формы рельефа, которые широко распространены на поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами. Их направление и количество, как правило, отражает характер нарушения горных пород и может предоставлять ценную информацию о геологических структурах,

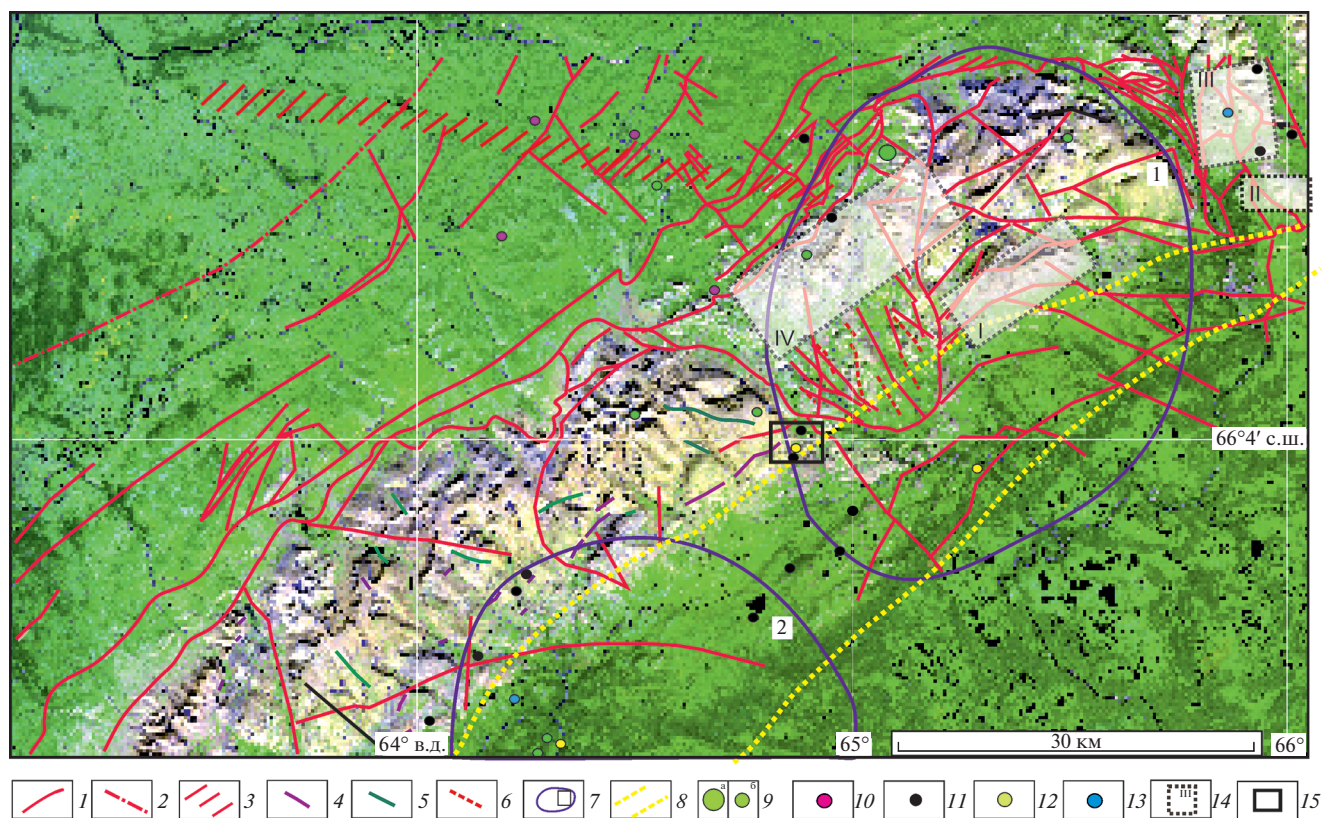


Рис. 4. Морфоструктурная карта ЦЧМЗ: 1–6 – соответствуют рис. 2, 7 – контуры: морфоструктур № 1–2; 8 – структура СВ простирания (Иванова и др., 2020); 9–13 – рудные месторождения и рудопроявления, соответствующие рис. 2; 14–15 – границы: 14 – участки, перспективные на золото-полиметаллическую минерализацию, 15 – Манюкю-Варчатинского рудного узла. Примечание: линеаменты, выделенные на основе КС, для ЦЧМЗ можно посмотреть в работе (Иванова и др., 2020).

тектонике и залегании ПИ (например, Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Abdullah et al., 2010; Thannoun, 2013), выделения морфологической системы кальдер (Verdiansyah, 2017, Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализации (Hubbard et al., 2012) и др. Он может проводиться на основе различных наборов данных, таких как оптическая, радиолокационная, геофизическая и топографическая съемки, ЦМР, наземные исследования и др.

Для извлечения линеаментов из данных SRTM был использован модуль “Lineament Extraction” программного комплекса PCI “Geomatica”. На базе ЦМР создано изображение, отражающее “теневой рельеф”, с целью улучшения топографических особенностей территории и облегчения идентификации линейных объектов (Wilson, Galtant, 2000).

Параметры модуля “Lineament extraction” подбирались практическим путем, так как качество выделения линеаментов зависит от характери-

стик исходных данных и типа рельефа исследуемой территории.

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

Метод соотношения полос (band ratio) улучшает спектральные характеристики геологических объектов и широко используется для картирования гидротермально измененных минералов и литологических единиц (Maurer, 2013). Данный метод усиливает спектральные особенности пикселей для мульти- или гиперспектральных изображений путем отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Подбор каналов производится на основе отражающей характеристики искомого геологического объекта. При этом в числителе отношения должен располагаться канал, характеризующий наибольшую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе – наименьшую. В результате искомый объект (или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении (красный цвет на рис. 6, а–б, г).

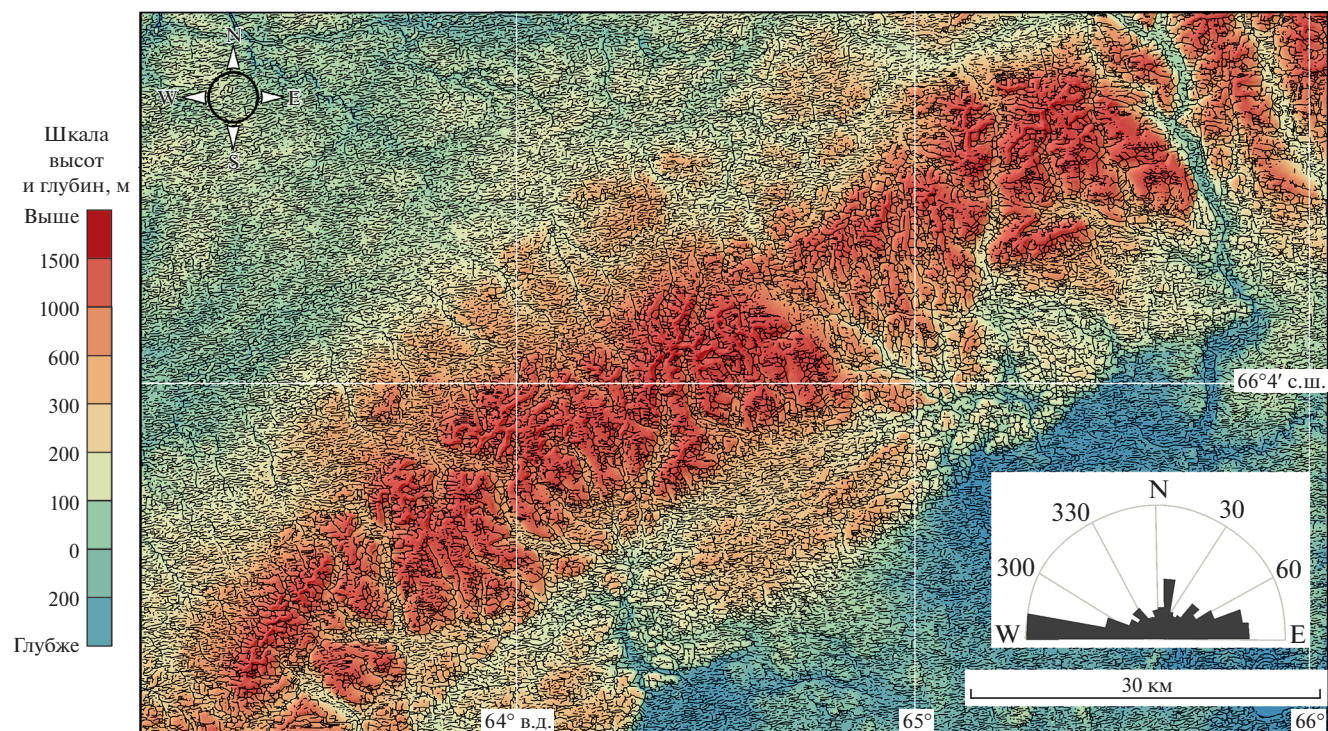


Рис. 5. Линеаменты, извлеченные с помощью модуля “Line Extraction” программного комплекса PCI “Geomatica” и наложенные на визуализированную ЦМР с применением SRTM (а), роза-диаграмма для ЦЧМЗ и прилегающей территории (б).

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА Landsat-8 разработано несколько минералогических индексов (Pour, 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–ОН и Fe, Mg–ОН), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весомые показатели (индикаторы) Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al/Fe–ОН, Mg–Fe–ОН и Si–ОН групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

Метод главных компонент (МГК) – это многомерный статистический метод, который выбирает 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). Первый главный компонент (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как он характеризуется наи-

большей 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, а также оптических многоспектральных сенсоров, установленных на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (Loughlin, 1991). Данный метод был применен к набору 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 были использованы результаты оценки минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы.

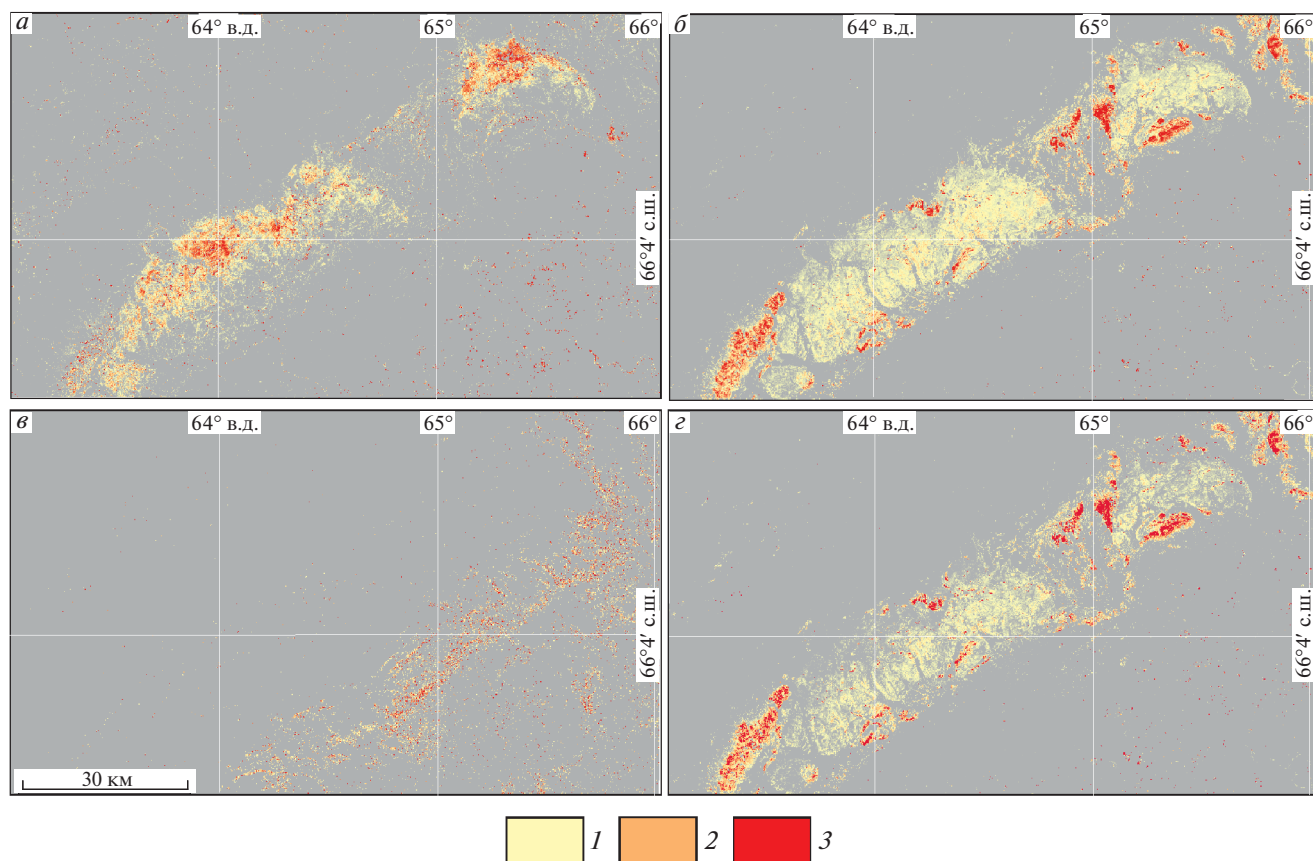


Рис. 6. Карта гидротермальных изменений ЦЧМЗ и прилегающей территории, полученная с помощью КС: *а–г* – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов: *а* – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих, *б* – оксидов трехвалентного железа (гематит), *в* – оксидов и гидроксидов железа (лимонит), *г* – оксидов двухвалентного железа (магнетит); *1–3* – метасоматические изменения: концентрации индикаторных групп вторичных минералов: минимальные (*1*), средние (*2*) и максимальные (*3*).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены две крупных структуры овальной формы. Морфоструктура № 1 имеет размер 54 на 48 км и вытянута в меридиональном направлении. Ее осложняют более мелкие кольцевые (около 7 км), дуговые и радиальные линейменты. Морфоструктура № 2 вытянута в СЗ направлении и имеет размеры немного меньшие (48 на 38 км), чем морфоструктура № 1.

К морфоструктуре № 1 приурочена большая часть рудопроявлений и месторождений: Fe, Ti, V, Cu; Cu, Zn, Mo и золоторудных. Рудопроявления Манюкую-Варчатинского рудного узла также принадлежат морфоструктуре № 1. В морфоструктуре № 2 обнаружены проявления Fe, Ti, V, Cu; Cu, Zn, Mo и с золоторудной и молибденовой минерализацией.

Морфоструктуры №№ 1 и 2 представляют собой вулcano-плутонические гетерогенные структуры 1-го порядка, вероятно, образованные под влиянием нескольких геологических процессов, и осложняются концентрическими структурами

2-го порядка (меньшего диаметра), создающими признаки “телескопированности” (ср., например, Горный и др., 2014). Анализ этих морфоструктур можно найти в работе (Иванова и др., 2020).

По геологическим данным (см. рис. 2) и КС (см. рис. 4) отчетливо выделяется Главный Уральский надвиг (ГУН). Это трансрегиональная разломная зона высшего ранга, разделяющая палеоконтинентальный и палеоокеанический секторы Уральской складчатой области протяженностью около 2000 км на глубину земной коры, со сложным строением, длительным и многостадийным развитием (Зылева и др., 2014). ГУН является перспективным на выявление гидротермально-метасоматической Ni и Au минерализации.

В период развития ГУН, вероятно, возникали разномасштабные, наложенные на складчатость концентрические структуры, которые играли ведущую роль в локализации, как магматических образований, так и оруденения (Космическая информация..., 1986).

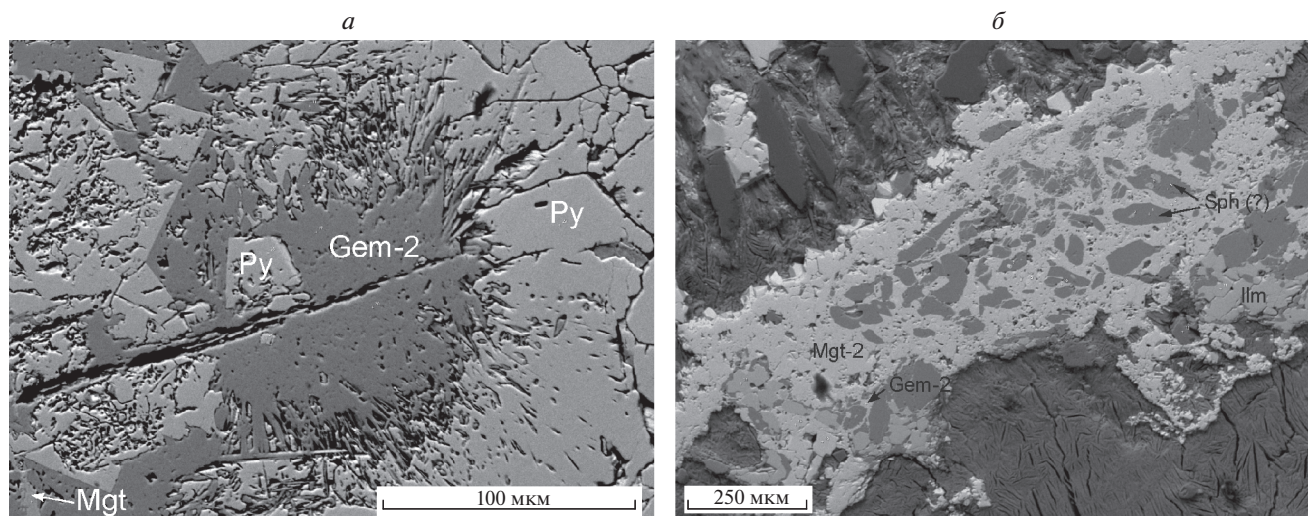


Рис. 7. Структуры распада рудопроявления Амфиболитовое: радиально-лучистый агрегат (волокнистая структура) гематита-2, сосредоточенный в катакластическом изъеденном пирите, локализованном в пироксените (?) (а), петельчатая структура, представленная ксеноморфным магнетитом, окаймляющим овалы включения 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.

На рис. 5 представлена визуализированная ЦМР с нанесенными линеаментами, выделенными модулем “Lineament extraction” ПО PCI “Geomatica”.

Ориентация линеаментов анализируется путем создания розы-диаграммы, которая представляет собой количество линеаментов, которые доминируют в определенном направлении. В результате были выделены основные направления структур (см. рис. 5).

Главные структуры – это линеаменты субширотной ориентации. Второстепенные – СВ и СЗ направлений.

В работе (Иванова и др., 2020) была выделена серия коротких линеаментов СВ простирания, сосредоточенных в полосе шириной 25 км при общей длине первые сотни км (рис. 4). Эта зона в совокупности образует структуру СВ направления, возможно, отражая дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории, а также, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. Эта зона также отчетливо проявляется на карте плотности линеаментов и по вторичным изменениям (рис. 6, в). Это говорит о правильности выделения этой области.

При анализе КС были выделены 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов и раздельно показанных на фрагментах рис. 6, а–б, г.

Как видно из рис. 6, б, в, г распределение оксидов трех- (гематит) и двухвалентного (магнетит) железа, особенно с высоким содержанием, совпадает, однако средние концентрации трехвалент-

ного железа чуть выше и распределены более равномерно по всей изучаемой площади, чем двухвалентного. Распространение гидроксил-(Al–ОН, Mg–ОН) и карбонат-содержащих и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) отличаются. Последние распределены (высокие и средние концентрации) в основном на ЮВ территории (см. рис. 6, в).

Скорее всего, это связано с тем, что, например, в аншлифах рудопроявления Амфиболитовое – ЦЧМЗ (см. рис. 1) часто присутствуют эти оксиды железа II и III совместно в виде разнообразных структур распада (рис. 7) (Иванова, Тюкова, 2022).

Учитывая геологические особенности локализации рудных объектов и данные обработки КС, выделены 4 наиболее перспективных участка, которые на схемах дешифрирования КС отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов оксида железа (II и III) (рис. 8, 5).

Площади № I и IV локализованы внутри, а участки № II и III возле морфоструктуры № 1.

В участок № I входят магматические породы основного и среднего состава второй фазы Собского и Кэршорского комплексов. С внедрением интрузий первого комплекса связано формирование Cu–Fe-скарнового с Au и Cu-порфирирового оруденения. С Собским комплексом связывают Au оруденение на месторождении Петропавловское, а также жильные проявления и пункты минерализации Cu в Тоупугол-Ханмейшорским рудном районе (Зылева и др., 2014).

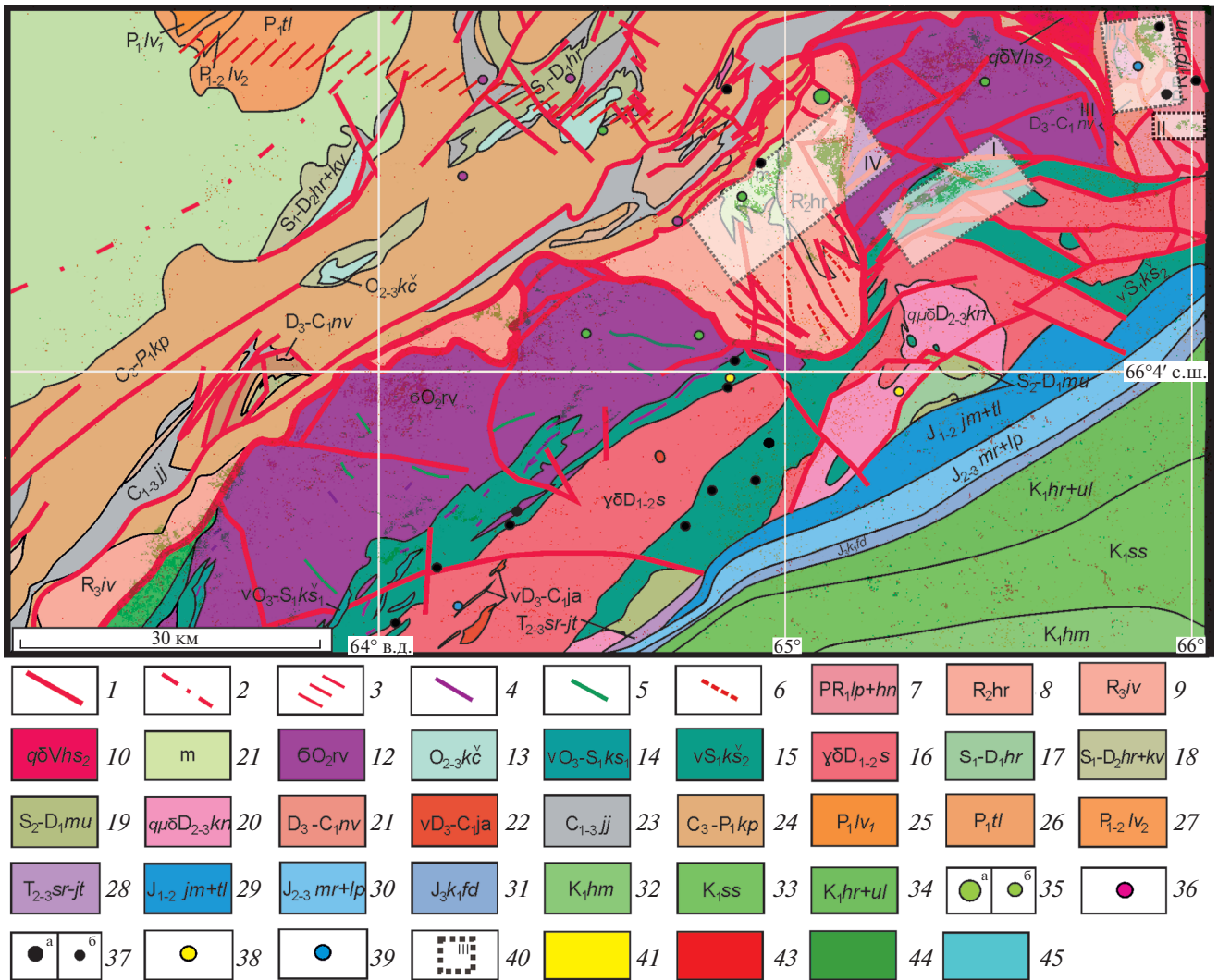


Рис. 8. Карта развития гидротермально-метасоматических пород для ЦЧМЗ по материалам Д33, вынесенных на геологическую карту (упрощена по (Шишкин и др., 2007)). 1–6 – соответствуют рис. 3, 7–39 – соответствуют рис. 2, 40 – границы участков, перспективных для выявления золото-полиметаллической минерализации на изучаемой территории (номера I–IV на карте – см. пояснения в тексте); 41–45 – вторичные изменения соответствуют рис. 10.

Участок № II состоит из метаморфических пород лаптюганской и ханмейхойской свит, вмещающих Cu минерализацию кварцево-жильного типа и метаморфогенную титан-рутиловую минерализацию. Кроме того, данная площадь перспективна для поиска гидротермально-метасоматической Mo минерализации.

Участок № III состоит также из пород лаптюганской и ханмейхойской свит. Кроме того, сюда входят породы няньворгинской свиты, представленные алевроглинистыми, глинисто-кремнистыми и углисто-кремнистыми фтанитами. Это благоприятная среда для локализации сингенетического марганцевого оруденения. В эту площадь входят также известные рудопроявления Fe–Ti–V–Cu и Mo типа. Это указывает на благоприятные условия для обнаружения на исследуемой

территории полиметаллического типа минерализации и говорит о выборе правильного подхода к прогнозированию рудной минерализации.

Участок № IV сложен породами хараматаловской серии (1), Кемпирсайско-Войкарского комплекса (2) и ивтысьшорской свиты (3). Серия (1) представлена чередованием графито-кварцевых, слюдяных и хлорит-альбитовых сланцев, кварцитосланцев и метаморфических пород. Это благоприятная среда для локализации Au–Pt минерализации черносланцевой формации. Комплекс (2) состоит из тектонитов с глыбами полиметаллического состава в серпентинитовом матриксе, глаукофанитов, бластомилонитов, бластокатаклизитов, включающих проявления сульфидных Ni руд. Свита (3) представлена вулканитами базальт-плагиориолитовой формации, переслоенны-

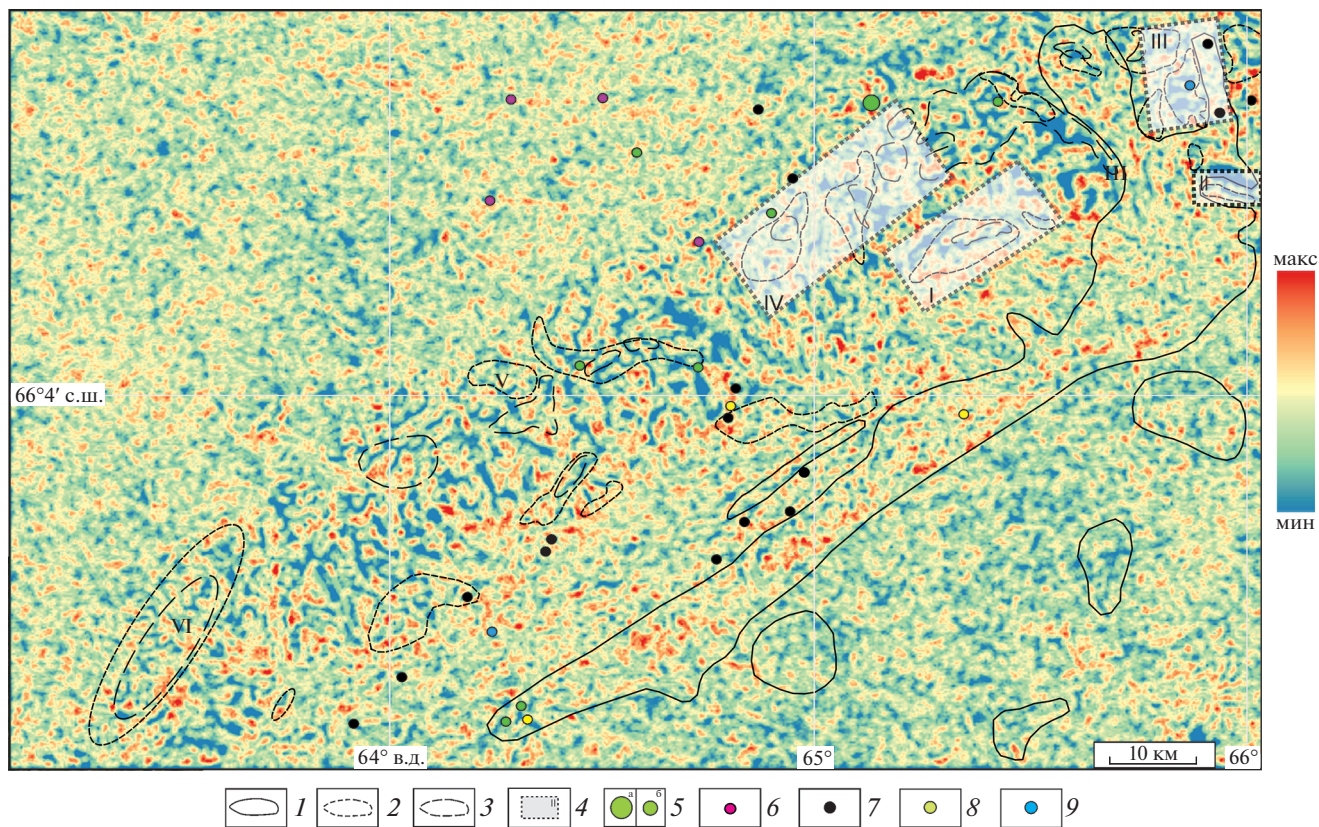


Рис. 9. Схема плотности линеаментов, полученная автоматическим способом выделения, для ЦЧМЗ и прилегающей территории с нанесенными на ней перспективными участками на золото-полиметаллический тип минерализации. Условные обозначения: 1–3 – вторичные изменения: 1 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 2 – оксиды двух- и трехвалентного железа объединенные; 3 – гидроксид- (Al–OH, Mg–OH) и карбонат-содержащие минералы, 4 – площади, перспективные на золото-полиметаллический тип минерализации, 5–9 – соответствуют рис. 2.

ми с туфами, туфогенно-осадочным и графитоидно-кварцевыми сланцами, прослоями и линзами мраморизованных известняков. Метасоматически измененные вулканиты свиты вмещают Cu-полиметаллическое оруденение колчеданного типа. В эту площадь также входят известные рудопроявления Cu–Zn–Mo, Fe–Ti–V–Cu и Mo–Cu типа.

На рис. 9 представлена карта плотности линеаментов для изучаемого района с наложенными на нее гидротермальными изменениями, дешифрованными по данным ДЗЗ. Плотность линеаментов характеризуется как степень проницаемости (т.е. нарушенности) горных пород.

Выявленные ранее рудопроявления и месторождения в основном локализуются в зонах с высокими значениями плотности линеаментов (красный/оранжевый цвет) и связаны со структурами, играющими рудоконтролирующую роль.

Таким образом, выделение перспективных участков основывалось на двух факторах. Первый – зоны распространения гидротермальных изменений, выделенных на основе обработки ДДЗ. Вто-

рой – области с высокими концентрациями линеаментов, т.е. сильно нарушенными горными породами.

Обнаруженные предшественниками рудопроявления входят в некоторые выделенные нами перспективные области, например, в перспективной площади № IV локализуется наибольшее количество рудопроявлений Cu–Zn–Mo, Mo–Cu и Fe–Ti–V–Cu типа, что говорит о достоверности полученных результатов вследствие применения разработанного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистической обработки данных КА ДЗЗ Landsat-8 построены карты распространения гидротермальных изменений для территории ЦЧМЗ: 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 Landsat-8 (минералогические индексы) и МГК.

Составлена схема плотности линеаментов, т.е. схема нарушенности горных пород в массиве, и выявлена тесная связь между известными рудными объектами и высокими значениями плотности линеаментов.

Выделены четыре участка, перспективных на золото-полиметаллический тип минерализации, на основе интеграции карт распространения метасоматических изменений и схемы плотности линеаментов, а также с учетом достоверных разрывных нарушений, играющих рудоконтролирующую роль. Выделение данных площадей основывалось на областях с максимальным развитием ассоциаций вторичных минералов и зонах с высокими концентрациями линеаментов.

Таким образом, на основании полученных в ходе исследования результатов можно сделать вывод, что золото-полиметаллическую гидротермальную минерализацию на территории ЦЧМЗ следует искать вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующую рудную минерализацию, и в пределах крупных морфоструктур, осложненных радиальными разрывными нарушениями 1-го порядка СВ и СЗ простирания протяженностью до 30 км, а также областей с повышенными значениями индексов оксидов железа (II и III), реже гидроксид- (Al—OH, Mg—OH) и карбонат-содержащих минералов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. и др. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.

Зылёва Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.

Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Структурный контроль золоторудной минерализации центральной части Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анали-

за мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 51–62.

Иванова Ю.Н., Нафигин И.О. Разработка подхода для построения прогнозной карты вероятностного распределения зон высокопроницаемых пород на полиметаллический тип минерализации по данным космического аппарата Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 1. <https://doi.org/10.31857/S0205961423010062>

Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э. Структуры распада в рудах проявления Амфиболитовое (Полярный Урал) // II науч. конф. “Геология на окраине континентов”. 2022. С. 143–145.

Космическая информация в геологии / Под ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1983. 536 с

Кременецкий А.А. Обоснование поисковых и поисково-ревизионных 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.

Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000 (2-е изд., цифровое). Серия Полярно-Уральский. Лист Q-41-XVI (Хордус). Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.

Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др. Девоновый 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., Астапов А.П., Кабатов Н.В. др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 3-е покол.). Уральская сер. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

Abdullah A., Akhir J.M., Abdullah I. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // Electr. J. Geotech. Engin. 2010. V. 15(6). P. 949–958. <https://doi.org/10.1039/CS9962500401>

Alonso-Contes C.A. Lineament mapping for groundwater exploration using remotely sensed imagery in a karst terrain: Rio Tanama and Rio de Arecibo basins in the northern karst of Puerto Rico. Master’s Thesis, Michigan Technological University. 2011.

Amer R., Kusky T., El Mezayen A. Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, central Eastern Desert of Egypt // Adv. Space Res. 2012. 49(1). P. 121–134.

Cheng Q., Jing L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. J. Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401. <https://doi.org/10.1080/01431160600606882>

- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *J Comp.and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P. et al.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // *Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften.* Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al.* The shuttle radar topography mission // *Reviews of geophysics.* 2007. 45(2), RG2004.
<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240 and 332–336.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L.* Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2012. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 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.
- 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 // *International J. Remote Sensing.* 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Loughlin W.P.* Principal component analysis for alteration mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y. et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2003. 108 (D17).
<https://doi.org/10.1029/2002JD002903>
- Masoud A., Koike K.* Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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, P. 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79: 101.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4>
- Mohamed F. Sadek, Baher A. El-kalioubi, Mohamed W. Ali-Bik et al.* // Utilizing Landsat-8 and ASTER data in geologic mapping of hyper-arid mountainous region: case of Gabal Batoga area, South Eastern Desert of Egypt // *Environmental Earth Sciences.* 2020. 79: 101.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4>
- 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.
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al.* Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. V. 13. №3. P. 519.
<https://doi.org/10.3390/rs13030519>
- Roy D.P., Wulder M., Loveland T.R. et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment.* 2014. 145. P. 154–172.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Singh A.K., Mondal G.C.* Remote sensing for mineral exploration. In *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* // Springer. 2016. P. 139–185.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39292-7_7
- Space information in geology* / Ed. A.V. Peive. M.: Nauka, 1983. 536 p.
- Teillet P.M. et al.* Radiometric normalization of surface reflectance data in the visible and near-infrared domains from EO-1 Hyperion // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1982. (3). P. 354–366.
- 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. J. 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 J. Geography.* 2019. V. 51. №1. P. 31–41.
<https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technosci.* 2017. 9(2).
- Wilson J.P., Gallant J.C.* Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Zhang Y. et al.* Comparison of four atmospheric correction algorithms for Landsat-8 OLI imagery in varying landscapes // *Remote Sensing.* 2017. 9(3). 233.
<https://doi.org/10.3390/rs9030233>

Application of the Landsat-8 Data Set and the Digital Elevation Model SRTM to Prediction Gold-Polymetallic Mineralization to the Central Part of the Malouralskaya Zone, the Polar Urals

J. N. Ivanova^{1, 2} and I. O. Nafigin¹

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

²*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

For the first time for the central part of the Malouralskaya zone of the Polar Urals, a new approach to processing data from remote sensing of the Earth was applied. The data were obtained using the Landsat-8 spacecraft. It consists in integration hydrothermal alteration propagation patterns and lineament density maps. They are based on the results of statistical processing of remote sensing data and digital elevation model SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission). The work was carried out in order to identify morphological features and patterns, features of the deep structure and identify promising areas of localization of gold-poly-metallic mineralization in the study area. As a result of the study, it was found that areas promising for the gold-polymetallic type of mineralization in the central part of the Malouralskaya zone are localized within trans-regional fault zones, crossing favorable horizons and structures, and controlling ore mineralization, morphostructures, complicated by radial discontinuous faults of the 1st order NE and NW direction with a length of up to 30 km, as well as zones of increased indices II and III, less often hydroxide-(Al-OH, Mg-OH) and carbonate-containing minerals.

Keywords: Earth remote sensing data, principal component analysis, digital elevation model, lineaments, discontinuities, morphostructural map, the Polar Urals, Landsat-8, lineament density map

REFERENCES

- Abdullah A., Akhir J.M., Abdullah I.* Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // *Electr. J. Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958.
<https://doi.org/10.1039/CS9962500401>
- Alonso-Cortes C.A.* Lineament mapping for groundwater exploration using remotely sensed imagery in a karst terrain: Rio Tanama and Rio de Arecibo basins in the northern karst of Puerto Rico. Master's Thesis, Michigan Technological University. 2011.
- Amer R., Kusky T., El Mezayen A.* Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, central Eastern Desert of Egypt // *Adv. Space Res.* 2012. 49(1). P. 121–134.
- Cheng Q., Jing L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. J. Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
<https://doi.org/10.1080/01431160600606882>
- 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. P. 131–137.
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *J. Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P. et al.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // *Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften.* Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al.* The shuttle radar topography mission // *Reviews of geophysics.* 2007. 45(2). RG2004.
<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh. et al.* Osobennosti mineralogicheskoy zonal'nosti rudno-magmaticheskikh sistem, vmeshchayushchikh kvartsevo-zhil'nyye mestorozhdeniya zolota (po materialam sputnikovoy spektrometrii) [Peculiarities of mineralogical zonality of ore-magmatic systems hosting quartz-vein gold deposits (according to satellite spectrometry data)] // *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2014. T. 11. № 3. P. 140–156. (In Russian).
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240 and 332–336.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L.* Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2012. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>.
- Ivanova J.N., Nafigin I.O.* Development of an approach for constructing a predictive map of the probabilistic distribution of high-permeability rocks zones for polymetallic mineralization type to data spacecraft Landsat-8 // *Research of the Earth from space.* 2023. № 1. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961423010062>
- 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., Vyhristenko R.I., Vikentiev I.V.* Structural control of gold mineralization in the central part of the Malouralskiy volcano-plutonic belt (Polar Urals) based on the analysis of multispectral images of the Landsat 8 spacecraft // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa,* 2020. № 4. P. 51–62.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 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.
- 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: 10000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (In Russian).
- 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 // *International J. Remote Sensing.* 2020. V. 41. № 2. P. 794–

812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Loughlin W.P.* Principal component analysis for alteration mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y. et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2003. 108 (D17).
<https://doi.org/10.1029/2002JD002903>
- Masoud A., Koike K.* Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4>
- 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, P. 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79: 101.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4>
- Mohamed F. Sadek, Baher A. El-kalioubi, · Mohamed W. Ali-Bik et al.* // Utilizing Landsat-8 and ASTER data in geologic mapping of hyper-arid mountainous region: case of Gabal Batoga area, South Eastern Desert of Egypt // *Environmental Earth Sciences.* 2020. 79: 101.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4>
- 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.
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al.* Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. V. 13. №3. P. 519.
<https://doi.org/10.3390/rs13030519>
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. St. Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014. 256 p. (In Russian).
- Roy D.P., Wulder M., Loveland T.R. et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment.* 2014. 145. P. 154–172.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- 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).
- Singh A.K., Mondal G.C.* Remote sensing for mineral exploration. In *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* // Springer. 2016. P. 139–185.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39292-7_7
- 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. № 5. P. 531–563.
- Teillet P.M. et al.* Radiometric normalization of surface reflectance data in the visible and near-infrared domains from EO-1 Hyperion // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1982. (3). P. 354–366.
- 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 J. Geography.* 2019. V. 51. №1. P. 31–41.
<https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technosci.* 2017. 9(2).
- 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.
- Wilson J.P., Gallant J.C.* Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Zhang Y. et al.* Comparison of four atmospheric correction algorithms for Landsat-8 OLI imagery in varying landscapes // *Remote Sensing.* 2017. 9(3). 233.
<https://doi.org/10.3390/rs9030233>
- 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. St. Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).