

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ  
НА ЗОЛОТОРУДНЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ  
И НАБОРА ДАННЫХ КА ДЗЗ HARMONIZED LANDSAT SENTINEL-2  
НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2024 г. Ю. Н. Иванова<sup>1,2, \*</sup>, А. А. Бочнева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

\*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

Впервые для ЮЗ части Малоуральской зоны Полярного Урала применен подход, который был апробирован путем объединения (1) методов математической обработки информации и (2) набора данных, полученных космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2. Первый основан на анализе поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей. Второй заключается в интеграции карт распределения гидротермальных изменений и схемы плотности линеаментов, созданных на основе результатов статистической обработки данных дистанционного зондирования. В результате проведенного исследования оконтурены две новые площади и выделены новые прогнозно-поисковые признаки золотого оруденения в пределах изучаемой территории. (1) Перспективные на золоторудный тип минерализации площади в ЮЗ части Малоуральской зоны локализованы вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующей рудную минерализацию, и в пределах вулканотектонической структуры (крупной морфоструктуры 40 на 45 км) 1-го порядка. Внутри нее располагаются системы частных вулканических построек 2-го и более высшего порядка, положение которых контролируется узлами сопряжения разрывных нарушений СВ и СЗ простирания протяженностью более 10 км. (2) В потенциально рудоносных вулканических постройках проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км<sup>2</sup>) с повышенными значениями индексов гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени – оксидов двухвалентного железа.

*Ключевые слова:* данные дистанционного зондирования Земли, метод главных компонент, цифровая модель рельефа, линеаменты, разрывные нарушения, морфоструктурная карта, Полярный Урал, Harmonized Landsat Sentinel-2, карта плотности линеаментов

DOI: 10.31857/S0205961424020043, EDN: FPADRN

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития естественных наук происходят существенные изменения методов анализа и обобщения получаемых данных в результате развития электронно-вычислительной техники и многофункционального специального программного обеспечения (СПО). Вследствие этого наблюдается интерес к использованию математических методов в естественных науках, в том числе и геологии (Босиков и др., 2020; Кривогузова, Васютенко, 2022), например, для обработки данных космических изображений космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Полу-

ченная с помощью разнообразных математических методов информация, содержащаяся в космических снимках (КС) геоинформационного обеспечения, включает в себя принципиально новые сведения о геологическом строении территорий, которую нельзя получить традиционными методами, помогает повысить информативность, уменьшить затраты времени и средств на поиск и оценку новых месторождений, сократить избыточность геологических данных для решения прогнозно-поисковых и прогнозно-оценочных задач (Nezampour, Rassa, 2005; Зверев и др., 2005; Tommaso, Rubinstein, 2007; Zhang et al., 2007; Миловский и др., 2007; 2010; Зверев, Гаврилова, 2012; Vural et al., 2017; Yousefi et al., 2018).

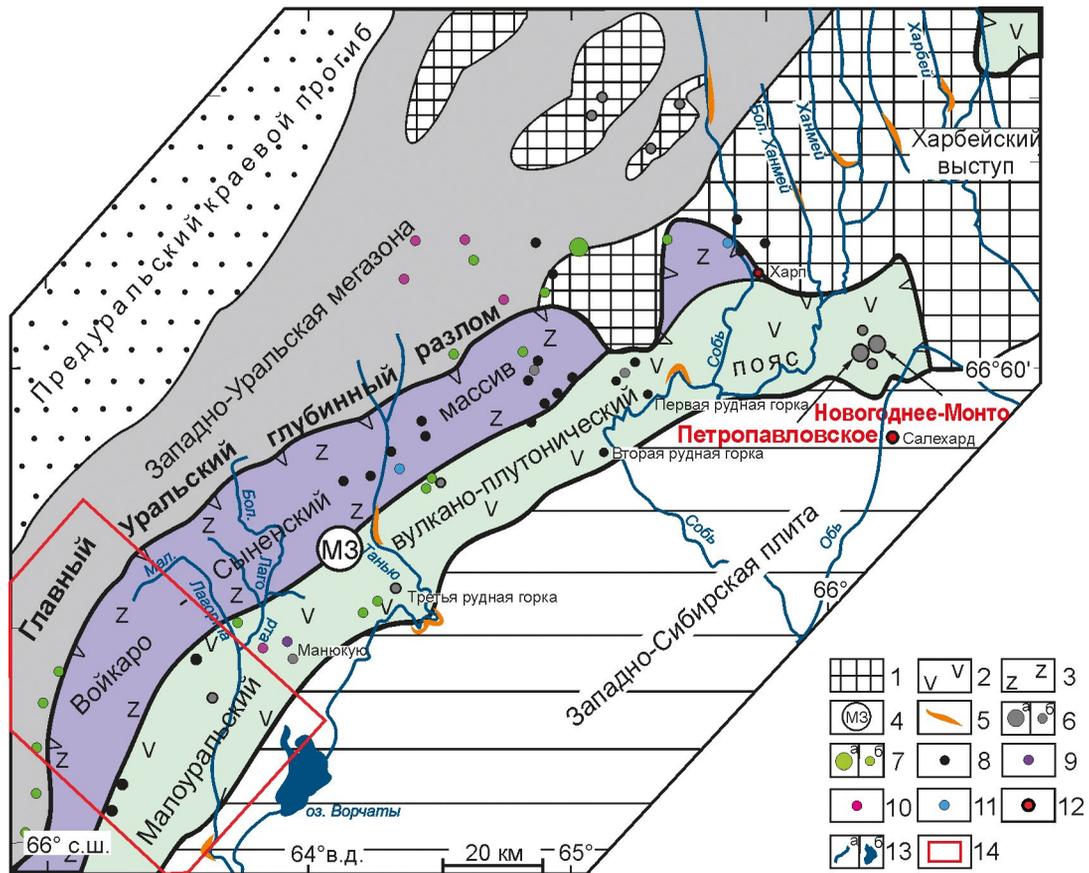
Объект исследования – ЮЗ часть Малоуральской зоны (МЗ) (рис. 1). Интерес к геологическим исследованиям на этой площади определялся экономической перспективностью района, расположенного на стыке двух бурно развивающихся территориально-производственных комплексов (Печорского угольного и Западно-Сибирского нефтегазодобывающего).

С середины 50-х годов прошлого века на территории МЗ было выявлено большое количество рудопоявлений, а также золоторудные месторождения – Петропавловское и Новогоднее-Монто (Волчков и др., 2007; Кениг, Бутаков 2013; Мансуров, 2013; Викентьев и др., 2017 и др.). На таких перспективных рудопоявлениях как Южно-Колчеданное, Игядей, Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное проведены поисково-разведочные работы на золото и хром (Галиуллин и др., 2009). Кроме того, здесь прогнозируются традиционные для Урала медно-порфировое, медно-кол-

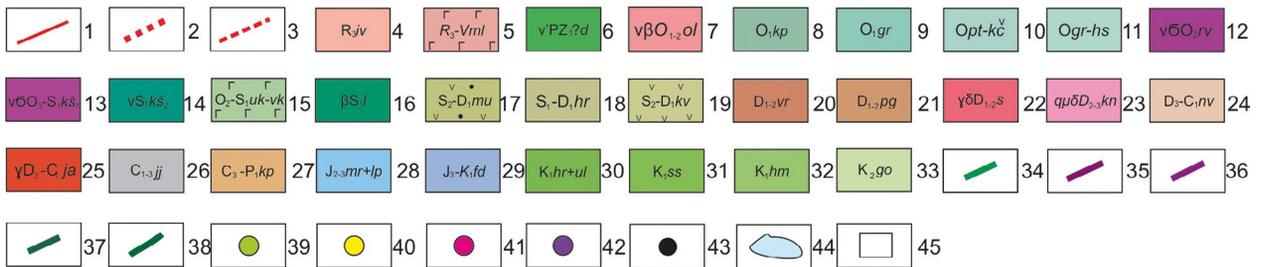
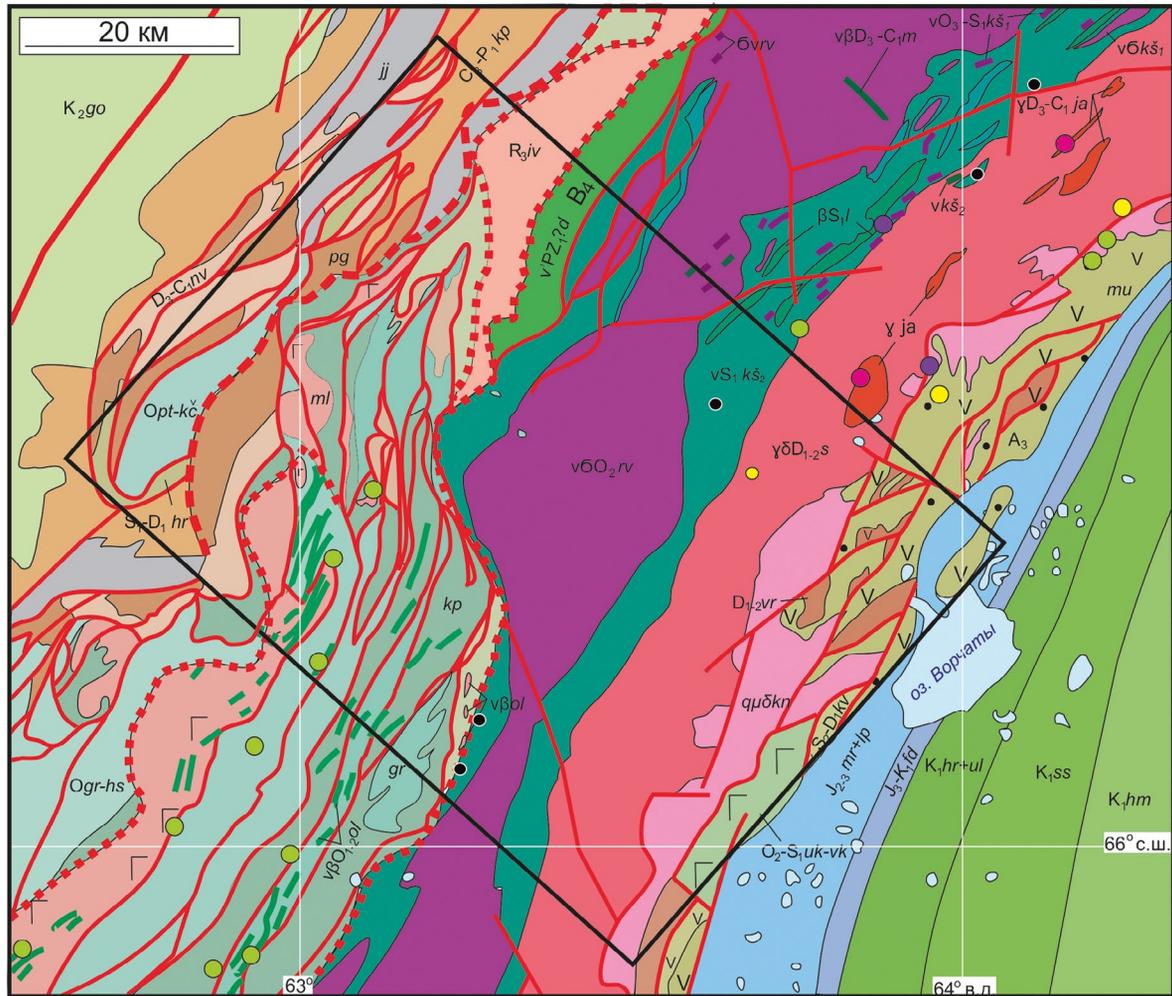
чеданное, железорудное, скарновое и другие виды оруденения (Душин, 2002; Кривко и др., 2014).

Слабая изученность и экономическая привлекательность формируют актуальность проблемы прогнозирования и поисков золоторудной минерализации в пределах восточного склона Полярного Урала (Беневольский и др., 2004; Волчков и др., 2007).

Цель работы – проанализировать и сопоставить прогнозную карту ЮЗ части МЗ, полученную в работе (Иванова, Бочнева, 2016) на основе методики анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей на золото-медно-порфировый тип минерализации с картой развития гидротермально-метасоматических пород и прогнозной схемой распределения зон высокопроницаемых горных пород на золоторудный тип оруденения, составленных в результате обработки данных КС КА ДЗЗ Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2), а также с учетом данных геологической карты, карты распределения ПИ и



**Рис. 1.** Схема Уральского складчатого пояса и положение изучаемой области в структурах Полярного Урала. Структурная основа по (Черняев и др., 2005) с изменениями: 1 – Центрально-Уральская мегазона, 2 – базальт-андезитовый комплекс, 3 – офиолиты, 4 – МЗ, 5 – россыпи золота; 6–7 – месторождения (а), рудопоявления (б): 6 – золоторудные и золотосодержащие; 7 – Cu-Zn-Mo; 8–11 – рудопоявления: 8 – Fe-Ti-V-Cu; 9 – Fe-Ti-Cu, 10 – Mo-Cu, 11 – Mo; 12 – населенные пункты; 13 – основные реки (а) и озеро (б), 14 – границы исследуемой территории.



**Рис. 2.** Геологическая карта изучаемой территории по (Шишкин и др., 2007) упрощенная. Условные обозначения: 1–3 – разрывные нарушения достоверные: 1 – выходящие на поверхность, 2 – надвиг, 3 – шарьяж; 4 – хараматаловская свита с чередованием графитоидно-кварцевых сланцев, графитоидных кварцитосланцев, слюдястых сланцев, кварцитов, эпидот-альбитовых амфиболитов, хлорит-альбитовых сланцев, гондитов; 5–6 – ультрамафит-метагабброноритовый дзеляюский комплекс с гипербазитами, габброноритами, амфиболитами; 7 – габбродолеритовый-абисальный оранжеугоанско-лемвинский комплекс с габбро-долеритами, долеритами, пикродолеритами, пикритами, дайками габбродолеритов; 8 – кокпельская свита с массивными и миндалевидными метабазитами, спилитами, алевролитами и аповулкагенными сланцами; 9 – грубеинская свита с алевролитами, филлитовыми сланцами и алевропесчаниками; 10 – нерасчлененные пагатинская, кибатинская и камчатская свиты с песчаниками, алевролитами известковистыми, алевритистыми известняками и петельчатými известняками; 11 – грубеинская и харбейшорская свиты с лиловыми и зелеными алевролитами, филлитовыми сланцами, алевропесчаниками и песчаниками; 12 – дунит-гарбуцитовый с дунитами райизско-войкарский комплекс, дунит-гарбуцитовая ассоциация с сетчато-жильными и полосчатыми выделениями дунитов, нерасчлененные гипербазиты; 13–14 – кэшорский дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый комплекс: 13 – первая фаза с дунитами, нерасчлененными верлитами, лерцолитами, 14 – вторая фаза с габбро, габброноритами, габбродиоритами, диоритами, дайками габбро; 15 – усть-конгорская и войкарская свиты нерасчлененные с подушечными и пластовыми спилитами, прослоями и линзами яшмоидов; 16 – лагортаюский комплекс

с габбродолеритами, долеритами параллельных даек; 17 – малоуральская свита с туфами базальтов, разнообломочных андезибазальтов, базальтов, дацитов, прослои туфопесчаников, туффитов с линзами рифтогенных известняков; 18 – харотская свита с углисто-глинистыми сланцами, фтанитами, пачками петельчатых известняков на венлокско-лудловском и пражско-эмском уровнях; 19 – кевсоимская свита с трахиандезитами, трахитами и их туфами, конгломератами, гравелитами, песчаниками, яшмоидами и известняками, среднего состава с лавами; 20 – варчатинская свита с метабазиитами, метаандезитами, метадацитами и их туфами, конгломератами, гравелитами, туфопесчаниками, туффитами, известняками; 21 – пагинская свита с песчаниками кварцевыми, алевролитами, аргиллитами, прослоями кремнисто-глинистых сланцев; 22 – диорит-тоналит-плагиогранитовый собский комплекс с гранодиоритами, тоналитами; 23 – монцогранодиоритовый конгорский комплекс с кварцевыми монцодиоритами плутоническими, кварцевыми монцодиоритами, гранодиоритами и диоритами; 24 – няньворгинская свита с алевроглинистыми, глинисто-кремнистыми, углисто-кремнистыми сланцами и фтанитами; 25 – гранитовый плутонический янославский комплекс с гранитами биотит-роговообманковыми, лейкогранитами и аляскитами; 26 – яйюская свита с граувакками, полимиктовыми песчаниками, известковистыми алевролитами, глинистыми сланцами, прослоями известняков и доломитами, 27 – кечпельская свита с мелкоритмичным переслаиванием полимиктовых мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов; 28 – средняя юра, батский ярус – верхняя юра, нижнетитонский подъярус, объединенные маурыньинская и лопсинская свиты с глинами, аргиллитами, песком и пластами бурых углей; 29 – верхняя юра, титонский ярус – нижний мел, нижеберрийский подъярус, федоровская свита с глауконит-кварцевыми алевролитами и песчаниками, иногда фосфатсодержащие, с оолитами шамозита, гравием, конкрециями; 30 – берриасский ярус, верхний подъярус – готеривский ярус, объединенные харосоимская и уласыньская свиты с аргиллитоподобными и алевролитистыми глинами, прослоями алевролитов, глинистых известняков и песчаников; 31 – готеривский-аптский ярус, северососьвинская свита с песками, алевролитами, уплотненными алевролитами, чередующимися с глинами, пласты бурых углей; 32 – альбский ярус, ханты-мансийская свита с глинами, алевролитами и прослоями алевролитов, глинистых известняков и сидеритов, реже песков; 33 – туронско-маастрихский ярусы с глауконито-опоковой толщей с прослоями кремнистых глин, опок и диатом; 34–38 – немасштабные тела: 34 – дайки габбродолеритов, 35 – гарбуцитов с выделениями дунитов, 36 – железистых дунитов, 37 – клинопероксенитов, 38 – дайки габбродолеритов; 39–43 – рудопроявления: 39 – Cu, 40 – золотосодержащие, 41 – Mo, Cu, 42 – Fe, Ti, Cu, 43 – Fe, Ti, V, Cu; 44 – озера; 45 – границы изучаемой территории.

геофизической информации для оконтуривания перспективных участков, выделения новых прогнозно-поисковых признаков и выявления геологических/морфологических особенностей изучаемой площади на золоторудный тип минерализации.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Изучаемая площадь состоит из пород комплексов и свит, принадлежащих следующим основным рудным районам: Войкаро-Сынинский хромитовый, Кэшорский платино-золото-меднорудный и Малоуральский медно-молибден-железородный.

Тагило-Магнитогорская минерагеническая мегазона расположена в пределах восточного склона Урала и соответствует одноименной тектонической мегазоне. Ее строение определяют в основном рудные формации, связанные с магматическими комплексами океанической и островодужной стадий палеоокеанического сектора уралаид.

В северной части мегазоны локализуется Райизско-Войкарская титан-медно-хромитовая минерагеническая зона ( $O_2-D_3$ ), пространственно совпадающая с Войкарской структурно-формационной зоной (СФЗ). В составе Райизско-Войкарской минерагенической зоны выделяются Войкаро-Сынинский хромитовый рудный район ( $O_2$ ) и изолированный Райизский хромоворудный узел ( $O_2$ ), состоящие из магматических плутонических пород ультраосновного состава райизско-войкарского комплекса (рис. 2), вмещающие залежи хромитовых руд, в которых содержатся металлы платиновой

группы (Os, Ir и др.) и повышенные концентрации Au, Co, Ni (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014; Викентьев и др., 2017).

Кэшорский золото-платино-меднорудный район ( $O_3-S_1$ ) слагают породы дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового кэшорского ( $S_1ks_2$ ) и лагортаюского ( $\beta S_1l$ ) (габбродолериты, долериты параллельных даек) комплексов.

Кэшорский комплекс на востоке граничит с Райизским и Войкаро-Сынинским гипербазитовыми массивами. Он образует полосу шириной до 5 км и протяженностью более 200 км. Комплекс является многофазным и полихронным, сформированный в процессе длительного и последовательного деплетирования мантийных ультрабазитов. С породами данного комплекса связаны залежи хромитовых руд повышенной железистости, железородная титано-магнетитовая и платино-золото-палладиево-меднорудная минерализация. В настоящее время начата промышленная оценка этих типов оруденения.

Лагортаюский комплекс располагается между метагаббро-амфиболитами и тоналит-плагиогранитами собского комплекса и прослеживается по простиранию более чем на 150 км при ширине до 3 км. Мощность отдельных даек достигает 2 м (Зылева и др., 2014).

Малоуральский медь-молибден-железородный район ( $S_1-D_3$ ) локализован в пределах Войкарской СФЗ. Он соответствует области развития острово-

дужных карбонатно-терригенно-вулканогенных образований малоуральской ( $S_2-D_1mu$ ), варчатинской ( $D_{1-2}vr$ ) и дзоля-варчатинской ( $D_{2-3}dv$ ), кевсоимской ( $S_2-D_1kv$ ), нерасчлененных усть-конгорской и войкарской ( $O_2-S_{1uk-vk}$ ) свит, прорванных интрузиями тоналитов собского ( $D_{1-2}s$ ), монцититов конгорского ( $D_{2-3}kn$ ) и лейкогранитов янаслорского ( $D_3-C_1ja$ ) комплексов. Для района характерны скарново-магнетитовое с Au и медно-молибден-порфиоровое с Au оруденения (например, рудопроявления Манюкую, Третья Рудная горка, Янаслорское, Элькшорское, Мокрый Лог и др.) (Викентьев и др., 2017).

Кроме того, помимо пород, слагающих вышеупомянутые рудные районы, на изучаемой площади локализованы другие свиты и комплексы, принадлежащие смежным зонам: грубеинская ( $O_{1gr}$ ), кокпельская ( $O_{1kp}$ ), кечпельская ( $C_3-P_1kp$ ) свиты и орангьюганско-лемвинский ( $O_{1-2ol}$ ) комплекс принадлежат Зилаиро-Лемвинской зоне (Погурей-Тыкотловский рудный район), объединенные маурыньинская и лопсинская ( $J_{2-3}mr+lp$ ) свиты, относящиеся к Приуральской зоне (Зылева и др., 2014).

Грубеинская и кечпельская свиты состоят из осадочных и метаморфических горных пород. Кечпельская свита является перспективной для выявления медно-колчеданной минерализации кипрско-го типа. Кокпельская свита состоит из осадочных и магматических пород основного состава. Объединенные маурыньинская и лопсинская свиты представлены осадочными породами. Орангьюганско-лемвинский комплекс содержит вулканические и магматические породы ультраосновного и основного состава, прорванные дайками основного состава. С породами комплекса ассоциирует золото-кварц-сульфидное оруденение (Шишкин и др., 2004).

Более подробное геологическое описание МЗ и прилегающих территорий можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Шишкин и др., 2007, Зылева и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Викентьев и др., 2017, Соболев и др., 2018 и др.).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Безоблачная дневная сцена КА HLS-2 HLS.S30.T41WNP.2020249T073619, снятая 20.09.2020 г. в 07:41:04 утра. Изображение было получено из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

HLS – проект Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration – NASA) и Геологической службы США (U.S. Geological Survey – USGS). Сходство спектров между оптическим устройством формирования изображения земли Landsat-8, Landsat-9 и мультиспек-

тральным прибором Sentinel-2 (MSI) предоставляет возможность согласовать данные отражательной способности поверхности (SR) и яркости верхней части атмосферы (TOA) с оперативного устройства Land Imager (OLI) на совместном спутнике NASA/USGS Landsat-8 и мультиспектрального прибора (MSI) на борту спутников Европейского космического агентства (European Space Agency – ESA) Sentinel-2A и Sentinel-2B для получения высококачественных изображений с целью мониторинга поверхности Земли и проведения различных прикладных исследований. Данные доступны на интернет-ресурсе [www.search.earthdata.nasa.gov](http://www.search.earthdata.nasa.gov) (Masek et al. 2018).

Гармонизация HLS гарантирует, что коллекции Landsat-8, Landsat-9 и Sentinel-2A/B (пространственное разрешение 30 и 10–20 м соответственно) можно использовать так, как если бы они представляли собой единую коллекцию. С помощью HLS можно получать изображения поверхности Земли с пространственным разрешением 30 м каждые 2–3 дня (Masek et al. 2018, Claverie et al., 2018).

В версию HLS-2 входят следующие обновления (Masek et al. 2018):

- глобальное покрытие (покрыта вся суша, крупные острова, но в нее не вошла Антарктида);

- входные данные (используются данные Landsat-8 Collection-2 (C2) с улучшенной геолокацией, поскольку данные C2 используют изображения Sentinel-2 (GRI) в качестве эталона);

- атмосферная коррекция (версия LaSRCv3.5.5 USGS применяется для данных Landsat-8 и Sentinel-2 для ускорения вычислений; LaSRCv3.5.5 был проверен как для Landsat-8, так и для Sentinel-2 в рамках CEOS ACIX-1);

- полоса оценки качества (Quality Assessment Band), которая названа в честь Fmask для двух продуктов HLS (S30 и L30) (уровень толщины аэрозоля из атмосферной коррекции включен в Quality Assessment Band);

- корректировка функции распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF) нормализует эффект угла обзора, при этом зенитный угол солнца практически не изменяется; она также применяется к полосам красного края Sentinel-2;

- формат продукта, поставляемый в виде отдельных файлов Cloud Optimized GeoTIFF (COG), что позволяет использовать спектральное и пространственное подмножество в приложениях.

**Предобработка КА HLS-2.** Атмосферная коррекция необходима для удаления из спутниковых данных эффектов атмосферных помех, которые могут

стать причиной ошибок при составлении минералогических схем и повлиять на значения отражательной способности различных минералов. К данным обоих датчиков применяется один и тот же алгоритм атмосферной коррекции – код отражения поверхности земли (LaSRC) (Vermote et al., 2016). Он основан на модели радиационного переноса ионов  $S^{6+}$  и продуктов MODIS MCD09 (Vermote and Kotchenova, 2008), а также более раннего алгоритма LEDAPS, реализованного для Landsat-5 и Landsat-7 (Masek et al., 2006). Более подробное описание метода можно найти в работе (Vermote et al., 2016). Результаты проверки отражательной способности поверхности для Landsat-8 и Sentinel-2 в рамках CEOS ACIX-I представлены в статье (Doxani et al., 2018).

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. HLS-2 имеет более точную геолокацию и основан на данных USGS Collection-2 Landsat, использующих глобальное эталонное изображение Sentinel-2 (GRI) в качестве абсолютного контроля. В результате улучшенный наземный контроль Landsat в Collection-2 устраняет необходимость в автоматической регистрации и ортотрансформировании (Automated Registration and Orthorectification Package – AROP).

HLS-2 обеспечивает попиксельные маски облаков, теней, снега и воды. Для Landsat-8 они представляют собой объединение масок, полученных из инструмента коррекции атмосферы LaSRC (данные маски в USGS Landsat TOA – Top of Atmosphere, в файле BQA). Для Sentinel-2 – объединение масок LaSRC и маски, созданной на основе алгоритма Fmask, адаптированного из работы (Zhu et al. 2015). Fmask запускается на 30-м совокупном коэффициенте отражения TOA.

Корректировка функции распределения двунаправленного отражения (the Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF). Продукты S30 и L30 Nadir BRDF-Adjusted Reflectance (NBAR) представляют собой коэффициент отражения, нормализованный для углов обзора и освещения Солнца. Угол обзора устанавливается на надир, а освещение – на основе широты центра плитки. Глобальный 12-месячный фиксированный метод BRDF с-фактора, представленный в работе (Roy et al., 2016), используется для нормализации BRDF. Он состоит из уникального набора коэффициентов BRDF, полученных из большого количества пикселей в продукте MODIS 500 м BRDF (MCD43), которые являются глобальными и распределены во времени (более 15 миллиардов пикселей). BRDF оценен с исполь-

зованием данных ETM+ за пределами надир (т.е. в областях перекрытия соседних полос и данных MSI) (Roy et al., 2016; Roy et al., 2017). Методика применяется на диапазонах OLI и MSI, эквивалентных диапазонам MODIS.

Зенитный угол Солнца, используемый при нормализации, представляет собой среднее значение зенитных углов Солнца в соответствующие моменты времени, когда Landsat-8 и Sentinel-2 пересекают широту центра плитки. Заданный зенитный угол Солнца рассчитывается с использованием СПО, предоставленного в работе (Li et al., 2018). Идея основана на том, что датчик пересекает одну и ту же широту в одинаковое местное солнечное время и, следовательно, зенитный угол Солнца будет одинаковым в надире для той же широты в тот же день.

Более подробную информацию о HLS версии 2.0 можно найти в работах (Masek et al. 2018, Claveriea et al., 2018).

Геологическая информация представлена в виде геологической карты дочетвертичных образований, карты ПИ и закономерностей их размещения (см. рис. 2) (масштабы карт 1:200000, листы Q-41-XV, XVI, XVII, XXI, XXII), составленных в рамках госзадания ВСЕГЕИ в 2005 г. (Кучерина и др., 1991, Овечкин и др., 1999, Шишкин и др., 2007, Мельгунов и др., 2008, Галиуллин и др., 2009).

Геофизические данные включали карты магнитного поля и гравитационных аномалий, масштабы 1:200000 (Шаповрев и др., 1986). Интерпретация геофизических полей проводилась с целью подтверждения и уточнения внешних контуров морфоструктур и структурных элементов.

С целью дистанционного картирования зон гидротермальных минералов были использованы мультинаборы данных для картирования групп гидротермальных минералов (карбонатные, глинистые, железистые). 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.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Линеаментный анализ.** Линеаменты – это прямые или приблизительно линейные формы рельефа, которые широко распространены по поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами. Направление и количество линеаментов отражает характер трещиноватости горных пород и может предоставлять ценную информацию о геологических

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

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Abdullah et al., 2010; Thannoun, 2013), выделения оставшейся морфологической системы кальдер (Verdiansyah, 2017, Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализации (Hubbard et al., 2012) и др.

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

Метод соотношения полос широко используется для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц, которые не видны на необработанных полосах (Maurer, 2013).

Этот метод был применен для усиления спектральных особенностей пикселей для изображений путем отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). 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.

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА HLS-2 разработано несколько минералогических индексов (Masek et al., 2018, табл. 1): 4/2 – минералы группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ильменит), а также ярозит и их смесь – лимонит; 11/4 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида двухвалентного железа (магнетит); 11/8 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида трехвалентного железа (гематит); 11/12 – гидроксилсодержащие (Al-OH и Fe, Mg-OH), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весомые показатели (индикаторы) Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, 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 выбирает некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственного вектора) переменных так, что каждый извлеченный компонент имеет наименьшую дисперсию. Более подробную информа-

**Таблица 1.** Номенклатура спектральных диапазонов HLS-2 (Masek et al., 2018).

Название канала	Номер канала OLI	Номер канала MSI	Кодовое название канала L8	Кодовое название канала S2	Длина волны, мкм
Coastal Aerosol	1	1	B01	B01	0.43–0.45*
Blue	2	2	B02	B02	0.45–0.51*
Green	3	3	B03	B03	0.53–0.59*
Red	4	4	B04	B04	0.64–0.67*
Red-Edge 1	–	5	–	B05	0.69–0.71**
Red-Edge 2	–	6	–	B06	0.73–0.75**
Red-Edge 3	–	7	–	B07	0.77–0.79**
NIR Broad	–	8	–	B08	0.78–0.88**
NIR Narrow	5	8A	B05	B8A	0.85–0.88*
SWIR 1	6	11	B06	B11	1.57–1.65*
SWIR 2	7	12	B07	B12	2.11–2.29*
Water vapor	–	9	–	B09	0.93–0.95**
Cirrus	9	10	B09	B10	1.36–1.38*
Thermal Infrared 1	10	–	B10	–	10.60–11–19*
Thermal Infrared 2	11	–	B11	–	11.50–12.51*

\* – OLI.

\*\* – MSI.

цию 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 был 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 были использованы результаты оценки минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы.

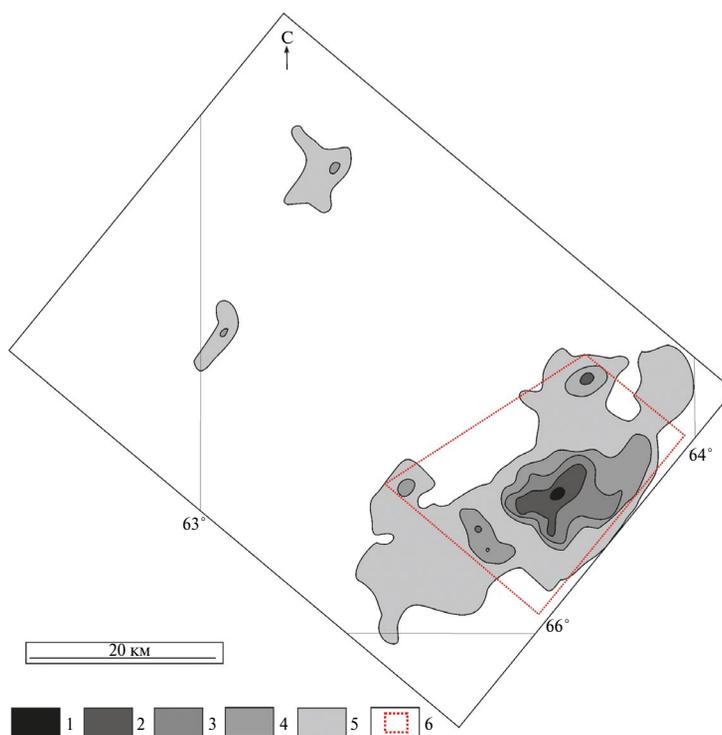
Систематизация и обобщение данных выполнена в программной среде QGIS. Все имеющиеся сведения были сконцентрированы в едином ГИС-проекте.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе работы (Иванова, Бочнева, 2016), посвященной разработке методики прогнозирования золото-медно-порфирового оруденения на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей на примере ЮЗ части МЗ, получена прогнозная карта на золото-медно-порфировое оруденение для изучаемой территории, представленная на рис. 3.

Методика состояла из следующих этапов:

1. Разработка прогнозно-генетической модели.
2. Подготовка массива исходных данных и формирование электронной базы данных.
3. Формализация геологических данных и сокращение их избыточности; формирование базы знаний.
4. Выбор информативных признаков; исследование корреляционных соотношений информативных поисковых признаков.



**Рис. 3.** Прогнозная карта на золото-медно-порфировый тип оруденения. Условные обозначения: 1–5 – рисковые зоны (различные уровни вероятности обнаружения оруденения), 6 – рекомендованная область проведения оценочных работ. По мере увеличения насыщенности цветов возрастает степень вероятности прогноза золото-медно-порфировой минерализации.

5. Составление многомерных рискованных матриц (многомерная рискованная матрица – многомерный структурированный массив информации, с которым можно проводить алгебраические операции и получать вероятности возможного наступления неблагоприятных событий) обнаружения золото-медно-порфирового типа оруденения и бифуркационных диаграмм для рискованного определения оруденения.

6. Итоговое моделирование. Построение прогнозной карты на золото-медно-порфировое оруденение.

На основе метода балльных экспертных оценок (Гитис, 1987; Гитис и Ермаков, 2004) выбраны следующие наиболее информативные признаки:

1. Группа признаков – “разрывные нарушения”, например, крупные глубинные разломы, возникающие на границе микроконтинента и палеокеанических структур; приуроченность к зонам развития региональных разрывных нарушений как продольных, так и поперечных и кососекущих по отношению к основному направлению региональных структур, а также к участкам их пересечений; разломы, контролируемые интрузии – региональные разломы СЗ и (или) СВ направлений и др.

2. Складчатые пояса, сложенные вулканогенными и вулканогенно-осадочными толщами.

3. Порфировые интрузии: диоритовые порфиры, биотит-рогообманковые диориты, кварцевые моноциты, плагиогранит-порфиры, гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры.

4. Широкое развитие вулканогенных пород базальт-андезитовой, андезитовой, андезит-дацитовой формации, реже – контрастно риолит-базальтового состава.

5. Локальные метасоматические изменения (бескислотизация, окварцевание, карбонатизация, серицитизация, альбитизация, аргиллитизация, пропицитизация, калишпатизация, известковые скарны, листвинитизация) с сульфидной и железоксидной минерализацией.

Анализ снимков HLS-2 позволил построить морфоструктурную карту площади исследования и прилегающей территории (рис. 4).

На рис. 4 представлена овальная морфоструктура 40 на 45 км, вытянутая в меридиональном направлении. Центральная и периферические ее части сложены магматическими плутоническими породами ультраосновного и основного состава райизско-войкарского, кэшорского комплексов и кокпельской свиты. Внешний контур состоит из магматических пород основного и среднего состава конгорского и собского комплексов.

По типизации (Шарпенюк, 1974, 2014) она принадлежит к вулканоплутоническому типу: структуры данного типа имеют большие размеры (до 60 км), осложнены коническими, радиальными, кольцевыми разрывными нарушениями либо ослабленными зонами, вдоль которых зафиксировано внедрение разнообразных интрузивных тел, образующихся в процессе магматизма.

Данная морфоструктура реконструирована как кальдера проседания. Общими особенностями механизма формирования таких структур являются процессы куполообразования, за которыми по мере опустошения, оттока или перераспределения магматического материала под тяжестью собственного веса следует проседание или обрушение и образование кальдеры проседания (Шарпенюк, 1974). На КС они имеют изометричную форму, приурочены к узлам пересечения/сочленения глубинных разломов, кольцевых, полукольцевых, дуговых и радиальных разрывных нарушений (Яковлев, 1982).

Кроме того, она является гетерогенной структурой, которая, вероятно, образована под влиянием нескольких геологических процессов, осложнена концентрическими структурами 2-го порядка (меньшего диаметра), создающими признаки “телескопированности” (ср., например, Горный и др., 2014), и контролируется узлами сопряжения СВ и СЗ разрывных нарушений. Такие сложнопостроенные системы кольцевых структур фиксируют глубинные энергетические очаги: мантийные диапиры, внутрикоровые магматические камеры, многоуровневые вулканоплутонические комплексы и ареалы их развития и влияния внутрикорового диапиризма и сопровождающего его магматизма. Именно они отражаются в материалах дистанционных съемок в виде систем телескопированных кольцевых структур корового уровня заложения (Томсон и др., 1982; Серокуров и др. 2008 и др.).

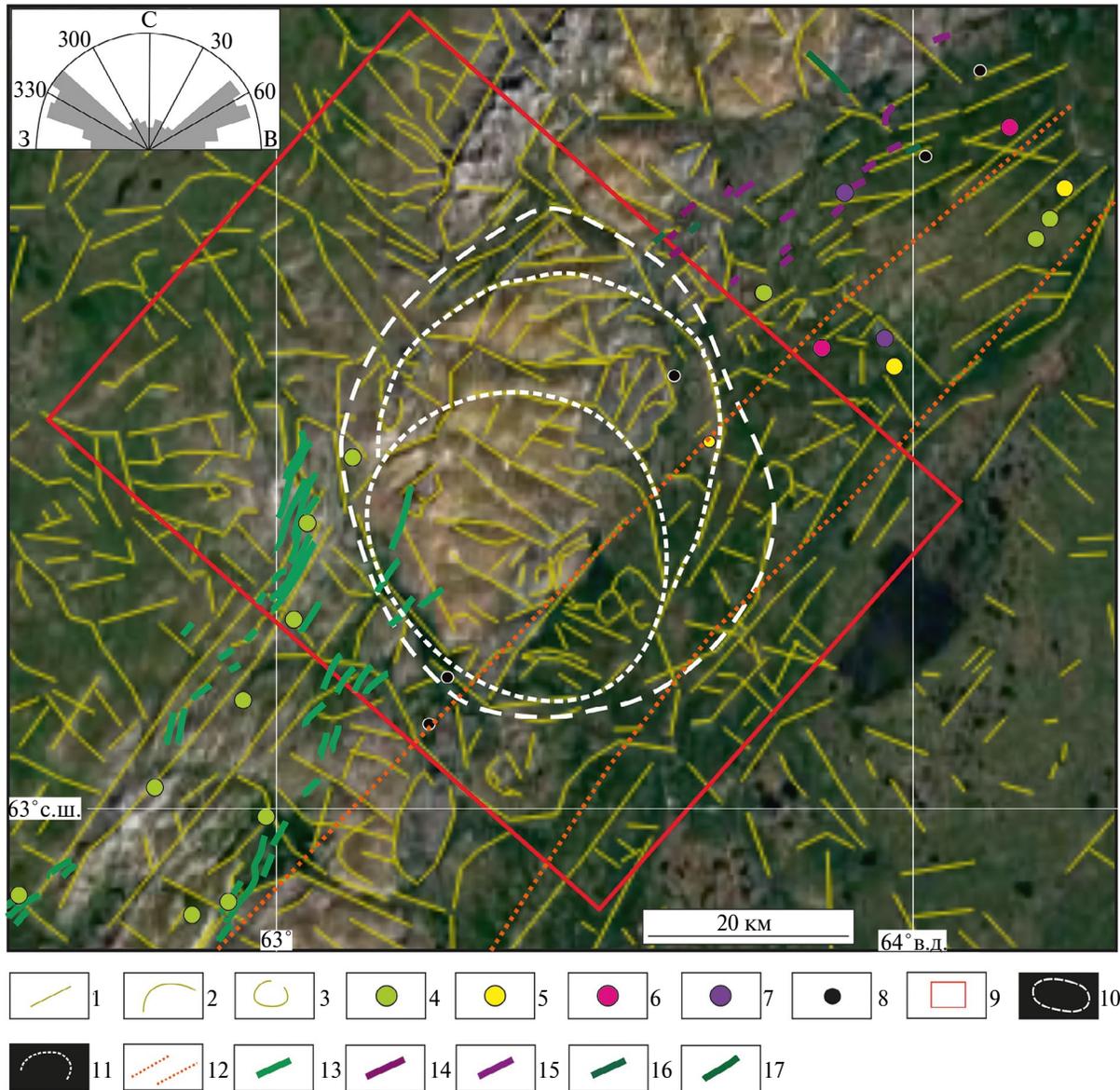
Важной характеристикой системы кольцевых структур выделенного палеовулканического аппарата 1-го порядка является глубина заложения магматического очага, с периодами тектонической активности которого, по всей видимости, было связано образование кольцевых структур меньшего диаметра. По расчетам (Ваганов и др., 1985; Аэрокосмические..., 2000) выяснено, что видимый диаметр структуры на поверхности в 2 раза больше, чем глубина очага. Из этого можно заключить, что магматическая камера располагалась на глубине примерно 21 км, а осложняющие ее структуры 2-го и более высоких порядков маркируют позицию промежуточных малоглубинных очагов (Горный и др., 2014).

Скорее всего, формирование средних и рядовых по запасам золоторудных и комплексных ме-

сторожений происходило в результате развития внутрикоровых гидротермально-метасоматических систем, концентрирующих благородные металлы. В результате в верхних слоях земной коры при распаде таких систем возникали преимущественно непротяженные по вертикали (не более 2 км) и небольшие по объемам прерывистые колонны рудных тел (Ананьев, 2017).

К периферии данной морфоструктуры приурочена большая часть рудопроявлений и месторождений: Cu, золотосодержащие, Mo, Cu; Fe, Ti, Cu; Fe, Ti, V, Cu.

По геологической карте (см. рис. 2), геофизическим данным (рис. 5) и анализу КС (см. рис. 4а) отчетливо выделяется Главный Уральский надвиг



**Рис. 4.** Морфоструктурная карта площади исследования и прилегающей территории, полученная по данным КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1–3 – линейменты: радиальные (1), дуговые (2), кольцевые (3); 4–8 – месторождения и рудопроявления, соответствующие рис. 2; 9 – границы территории исследования; 10–11: палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка) (10), морфоструктуры 2-го порядка (11); 12 – структура СВ простираения, уточненная по геофизическим данным (а), роза-диаграмма для ЮЗ части изучаемой площади и прилегающей территории (б); 13–17 – внемасштабные субвулканические тела (дайки), соответствующие и вынесенные с рис. 2.

(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..., 1983).

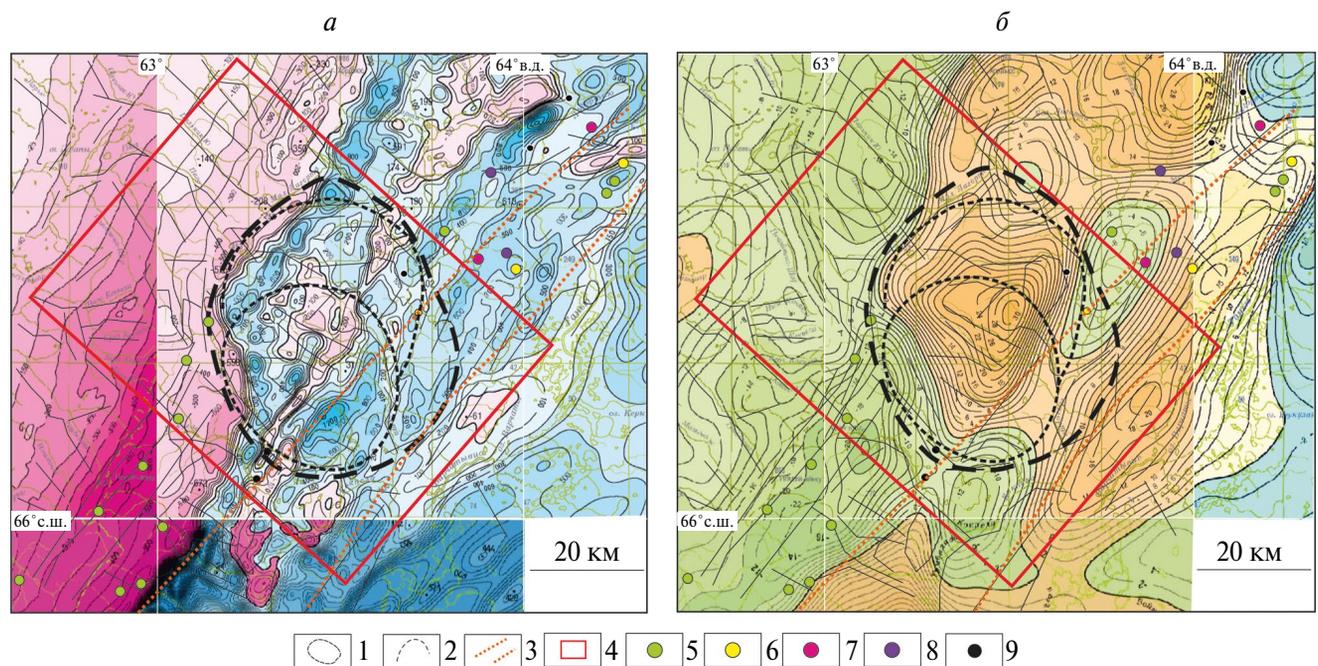
Ориентация линеаментов анализируется путем создания розы-диаграммы, которая представляет собой количество линеаментов, доминирующих в определенном направлении. В результате были выделены основные простирания структур (рис. 4б).

Главные структуры – это линеаменты СЗ и СВ ориентации. Второстепенные – субширотного и сумеридионального направлений. Вероятно, разрывные нарушения СВ ориентации принадлежат ГУН, а СЗ – более древнего заложения (Лесняк и др., 2022). Кроме того, минерализованные зоны и рудопроявления (Манюкую, Первая Рудная Горка),

известные на территории исследования, также вытянуты в СВ простирании.

В работе (Иванова и др., 2020) для Центральной части Малоуральской зоны (ЦМЗ) была выделена серия коротких линеаментов СВ простирания, сосредоточенных в полосе шириной 25 км при общей длине первые сотни км. Эта зона в совокупности образует структуру СВ направления, возможно, отражая дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории, а также, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. Она, скорее всего, образовалась позднее выделенной морфоструктуры, так как при пересечении с кольцевыми структурами линейные структуры пересекают их как без видимых смещений, так и с разрывами, обрезаниями, смещениями отдельных частей кольцевых разломов (Космическая информация..., 1983). Данная зона протягивается далее на ЮЗ (см. рис. 4). Эта зона также отчетливо проявляется и на карте развития гидротермально-метасоматических пород, выделенных с помощью КС (рис. 6), а также магнитных и гравитационных полях (см. рис. 5). Это говорит о правильности выделения этой области.

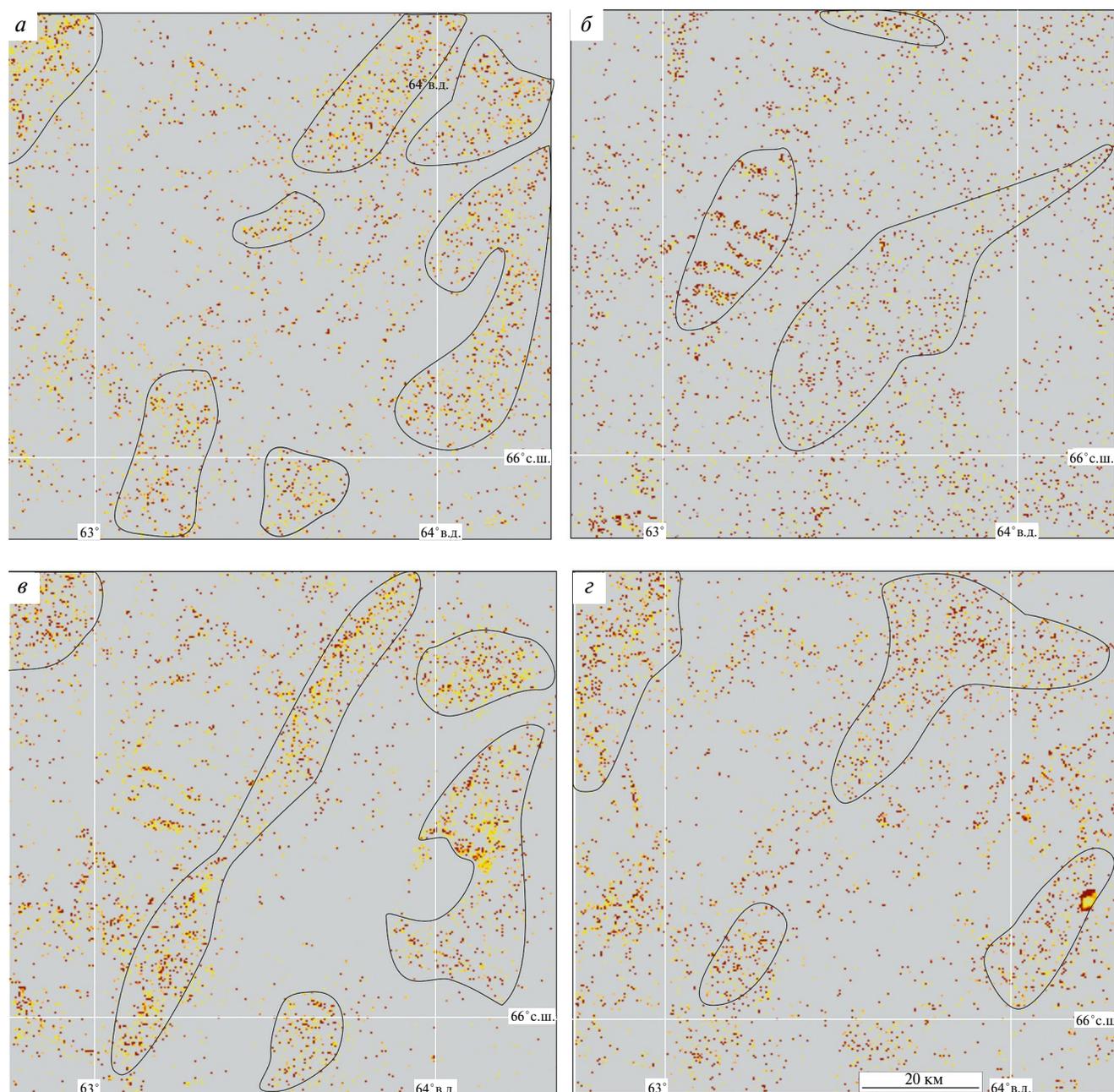
В потенциально рудоносных вулканических постройках должен быть проявлен метасоматический ореол значительной площади (более 30 км<sup>2</sup>). На площадях, где из-за наличия перекрывающих толщ



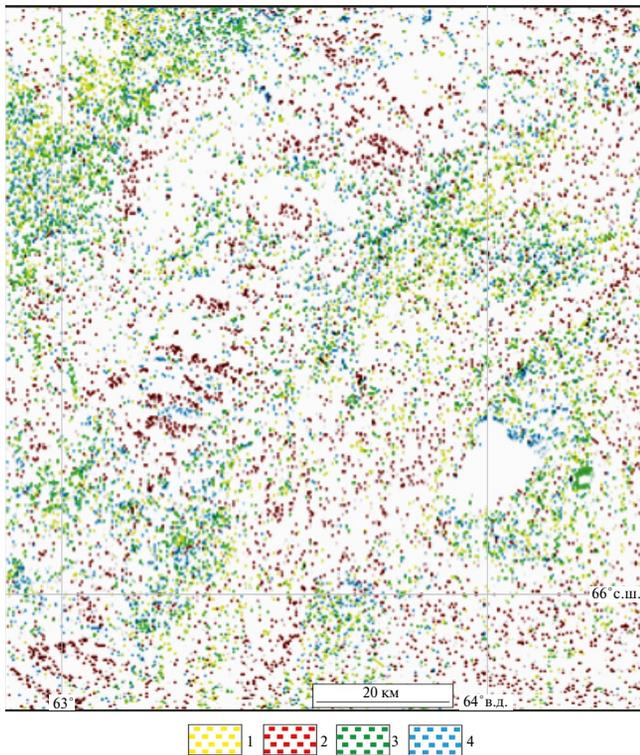
**Рис. 5.** Положение изучаемой территории в физических полях: магнитное (а) и гравитационное (б). Условные обозначения: 1 – палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка), 2 – морфоструктуры 2-го порядка, 3 – структура СВ простирания, 4 – границы изучаемого района, 5–9 – рудопроявления и месторождения, соответствующие рис. 2.

либо более поздних осадочных комплексов, либо экранирующего слоя менее проницаемых вулканических пород метасоматический ореол может быть проявлен и на более меньшей площади (до 10 км<sup>2</sup>) (Левочская и др., 2021; Gray, Coolbaugh, 1994). Другими признаками потенциальной рудоносности

частных вулканических построек могут служить особенности проявления зон с повышенными значениями индексов оксида железа II и III, реже гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа КС, выявлен-



**Рис. 6.** Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученные с помощью КС КА HLS-2: *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, линиями указаны контуры максимальных концентраций (сгущения точек) вторичных изменений.



**Рис. 7.** Объединенная схема развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученная с помощью КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы, 2 – оксиды трехвалентного железа (гематит), 3 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), 4 – оксиды двухвалентного железа (магнетит).

ные для сопредельной площади (Центральная часть МЗ) в работе (Иванова, Нафигин, 2023).

В результате для изучаемой территории впервые закартированы 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов, отдельно и совместно показанные на рис. 6а–г и 7.

Как видно из рис. 6а–г, распределение – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), а также оксидов двухвалентного железа, особенно с высоким содержанием, в целом совпадает. При этом наибольшее скопление средних и высоких концентраций локализовано в СЗ части территории. Распространение же оксидов трехвалентного железа (гематит) отличается. Это можно, вероятно, объяснить наличием перекрывающихся толщ в виде более поздних осадочных комплексов, например, кечпельская свита представлена разнообразными осадочными горными породами (песчаники, алевролиты и аргиллиты).

На рис. 8 представлена карта плотности линеаментов для изучаемого района и прилегающих территорий с наложенными на нее гидротермальными изменениями, дешифрованными по данным КС КА ДЗЗ. Плотность линеаментов характеризуется как степень проницаемости (т.е. нарушенности) горных пород.

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

Учтены следующие признаки: (1) геологические особенности: расположение вулканоплутонической структуры вдоль трансрегиональной разломной зоны высшего ранга, осложненной дуговыми, радиальными и конусными разрывными нарушениями, вдоль которых локализованы субвулканические тела, с которыми связано оруденение (Шарпенюк, 1974); (2) зоны распространения гидротермальных изменений, выделенные на основе обработки КС КА ДЗЗ; (3) области с высокими концентрациями линеаментов, т.е. сильно нарушенными горными породами; (4) локализация рудных объектов, – выделены 2 перспективных участка, которые на схемах дешифрирования КС отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов распределения гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), а также оксидов двухвалентного железа (см рис. 8 и 9). Перспективная площадь № 1 пересекает участок, который ранее выделен в работе (Иванова, Бочнева, 2016), что говорит о достоверности данной методики.

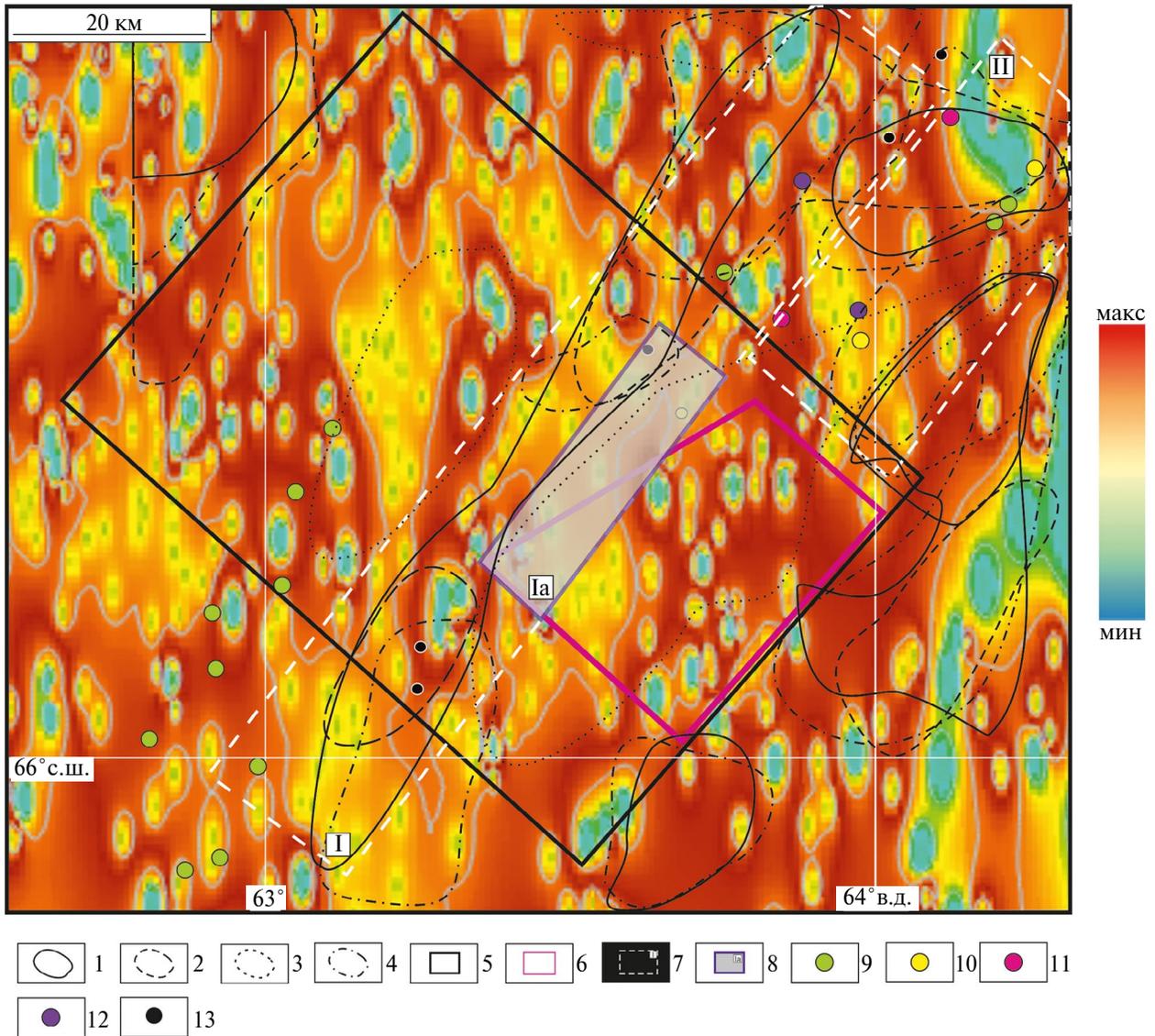
В выделенный на основе анализа КС перспективный участок № I входят грубеинская и кечпельская свиты, кэшорский, лагортаюский, орангьюганско-лемвинский и собский комплексы (см. рис. 9).

На этой площади локализованы месторождения и рудопроявления Fe-Ti-V-Cu, Fe-Ti-Cu, Mo-Cu и золотосодержащие.

Перспективный участок № II состоит из пород малоуральской, варчатинской и объединенных маурыньинской и лопсинской свит, конгорского, янославского и собского комплексов.

К данной территории принадлежат Cu, Fe-Ti-Cu и золотосодержащие месторождения и рудопроявления.

Перспективная площадь Ia, выделенная в результате анализа набора данных КС КА ДЗЗ HLS-2 и на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей, также состоит из кэшорского и собского комплексов.



**Рис. 8.** Схема плотности линеаментов, полученная ручным способом выделения, для изучаемой и прилегающей территорий с нанесенными на ней перспективными участками на золоторудный тип минерализации и областями развития гидротермальных изменений. Условные обозначения: 1–3 – вторичные минералы: 1 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 2–3 – оксиды двух- и трехвалентного железа; 4 – гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы; 5–8 – границы: 5 – изучаемой территории, 6 – площади, выделенной на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей, 7 – выделенные по материалам КС (номера I–II на карте – см. пояснения в тексте), 8 – территории, околтуренной на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей и материалов КС – участок первой очереди (номер на карте Ia – см. пояснение в тексте); 9–13 – рудопоявления и месторождения, соответствующие рис. 2.

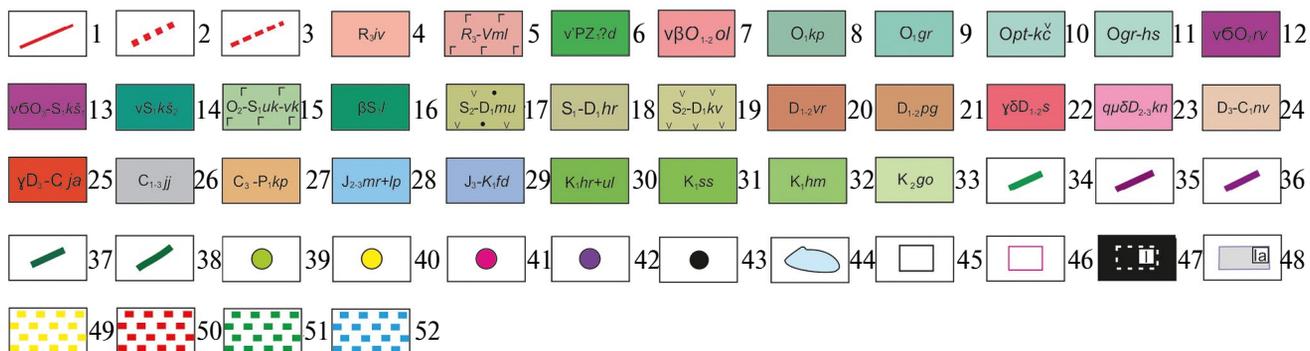
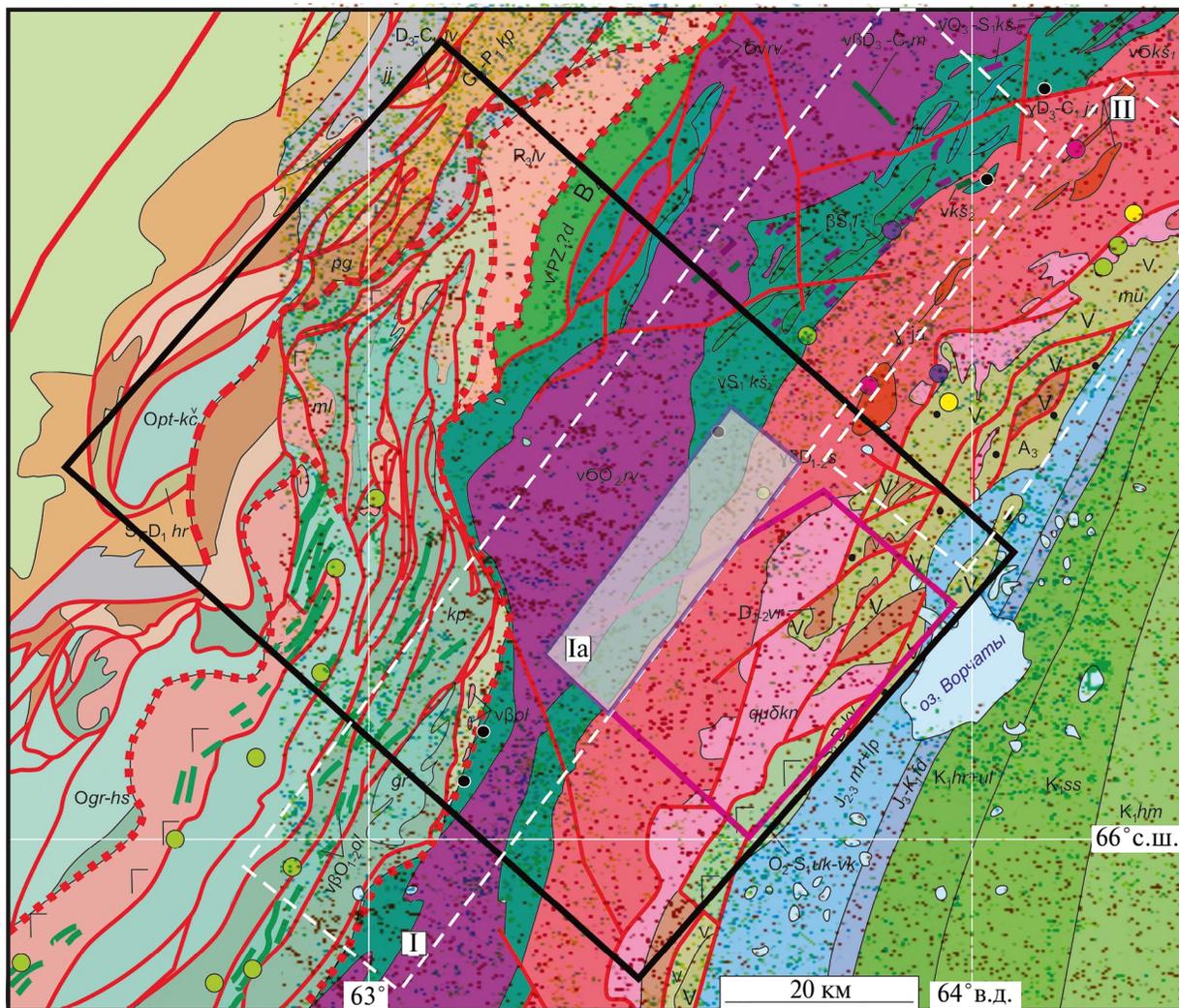
сов. Для этой территории известны Fe-Ti-V-Cu и золотосодержащее рудопоявления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистической обработки данных КА ДЗЗ HLS-2 построены карты распространения гидротермальных изменений для изучаемой

территории: 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 HLS-2 (минералогические индексы) и МГК.

Составлена схема плотности линеаментов, т.е. схема нарушенности горных пород в массиве, и вы-



**Рис. 9.** Геологическая карта по (Шишкин и др., 2007) и вынесенная на нее схема развития гидротермально-метасоматических пород для изучаемой территории, полученная по материалам КС КА Д33 HLS-2. Условные обозначения: 1–44 – соответствуют рис. 2, 45–48 – границы площадей идентичные рис. 8, 49–52 – ассоциации вторичных минералов, соответствующие рис. 7.

явлена тесная связь между известными рудными объектами и высокими значениями плотности линеаментов.

Выделены два участка, перспективных на золоторудный тип минерализации, на основе интеграции карт распространения метасоматических изменений и схемы плотности линеаментов, геофизических данных, а также с учетом достоверных разрывных нарушений, играющих рудоконтролирующую роль.

Оконтурен участок первой очереди, выделенный в результате объединения методики анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей и подхода к обработке данных КС, полученных с помощью КА ДЗЗ HLS-2.

Выявлены закономерности и на их основании сформулированы прогнозно-поисковые признаки золотого оруденения в пределах ЮЗ части МЗ Полярного Урала:

1. Структурный признак. Площади, перспективные на золоторудную минерализацию, следует искать вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующей рудную минерализацию, и в пределах вулканоплутонической структуры 1-го порядка, развитой над внутрикоровыми магматическими камерами, вулканоплутоническими комплексами и ареалами их влияния. Положение вулканоплутонической депрессии контролируется структурой СВ простирания более позднего заложения.

2. Структурно-вещественный признак. Благоприятная золоторудная минерализация тяготеет к краевым частям вулканоплутонической структуры 1-го порядка. Структурными критериями для выделения перспективных площадей являются системы кольцевых структур 2-го и более высокого порядка. Положение таких построек контролируется узлами сопряжения разрывных нарушений СВ и СЗ простирания протяженностью более 10 км. В потенциально рудоносных вулканических постройках должны быть проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км<sup>2</sup>) с повышенными значениями индексов гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени оксидов двухвалентного железа.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Чурсина И.Н. за ценные советы при планировании исследования.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-17-00266.

#### 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.

Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А.В. Перцова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.

*Беневольский Б.И., Волчков А.Г., Процкий А.Г.* Перспективы создания рудной сырьевой базы золотодобывающей промышленности в Полярноуральском регионе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2004. № 2. С. 10–15.

*Босиков И.И., Выскребенец А.С., Цудаев Б.С., Белуков С.В.* Совершенствование методов для повышения эффективности оценки, анализа и разработки медно-никелевых месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11–1. С. 40–53. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-40-53.

*Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др.* Взрывные кольцевые структуры шитов и платформ. М.: Наука, 1985. 200 с.

*Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др.* Золотопорфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.

*Волчков А.Г., Гирфанов М.М., Новиков В.П.* Перспективы развития минерально-сырьевой базы золота Полярного Урала (ЯНАО) // Проблемы освоения МСБ твердых полез. ископ. на Полярном Урале. Салехард, 2007. С. 188–190.

*Галиуллин И.З., Ремизов Д.Н. и др.* Геолого-минералогическое картирование (ГМК) масштаба 1:200000 листов Q-41-XYI, XYII, XXI, XXII (Восточно-Войкарская площадь). Геологический отчет // ОАО Полярно-Уральское ГПП. г. Лабетанги. 2009. <http://geolfond.3dn.ru>.

*Гитис В.Г.* Методика аппроксимации функциональных зависимостей по балльным экспертным оценкам // Проблемы передачи информации. 1987. Том XXIII. Вып. 3. С. 94–100.

*Гитис Г.В., Ермаков Б.В.* Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 256 с.

*Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А.* 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.

*Душин В.А., Малюгин А.А., Козьмин В.С.* Металлогения золота Полярного Урала // Вестник СПбГУ. Сер. "Геология и география". 2002. № 2. Вып. 7. С. 72–81. 2.

*Зверев А.Т., Гаврилова В.В.* Разработка теории и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 5. С. 44–47.

*Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Базза А.* Прогноз месторождений рудных полезных ископаемых на территории Чили на основе линеamentного анализа космических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 6. С. 62–69.

- 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., Викентьев И.В.* Геологическая позиция и структурный контроль золоторудной минерализации Малоуральского вулcano-плутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 Печатный // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 51–62.
- Иванова Ю.Н., Бочнева А.А.* Прогнозирование перспективных площадей на золото-медно-порфиновый тип оруденения на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 41–50.
- 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 (в печати).
- 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.
- Космическая информация в геологии / Под ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Кривко Т.Н., Золоев К.К., Коротеев В.А.* Новые данные по рудопроявлениям Рудногорненского района и вероятность открытия промышленных объектов “новогодненского типа” (Полярный Урал) // “Золото и технологии”. 2014. № 3(25). С. 14–17.
- Кривогузова А.С., Васютенко Д.М.* Анализ применения тематического моделирования в геологии // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки. 2022. № 1. С. 101–107.
- Кучерина П.М. и др.* Отчет Хараматалоуской партии по объектам: Производство геологического доизучения масштаба 1:50000 площади массива Рай-Из и его обрамления. Листы Q-41–46-Б в, г, Q-41–47-А-а-3,4, в, г, В, Г; Q-41–48-А и групповой геологической съемки масштаба 1: 50000 листов Q-41–56-В-б, в, г, Г; Q-41–57-А, Б, В-а и геологического доизучения листов Q-41–56-А, Б, В-а; Q-41–57-В-б, в, г, Г-а, в, г в пределах северо-западной области Войкарского синклиория, проведенных в 1982–1991 гг., пос. Полярный, 1991.
- 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 эпитермального 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 эпитермального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 60–72.
- Мансуров Р.Х.* Геолого-структурные условия локализации Петропавловского золоторудного месторождения (Полярный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2013. 22 с.
- Мельгунов А.Н. и др.* Геологический отчет “Прогнозная оценка ресурсного потенциала Северного, Приполярного и Полярного Урала на основе современных геолого-геофизических, минерагенических, геохимических и изотопных методов исследований”. ФГУП ВСЕГЕИ, СПб. 2008. Электронная версия.
- Миловский Г.А., Денисова Е.А., Ежов А.А., Каленкович Н.С.* Прогнозирование оруденения на Сось-Харбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 29–36.
- Миловский Г.А., Рудаков В.В., Лебедев В.В. и др.* Применение космической съемки для прогноза золотого оруденения в зонах глубинных разломов на Северо-Востоке России // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 30–34.
- Овечкин А.М. и др.* Поисковые работы на хромиты в северной части Войкаро-Сынинского гипербазитового массива. Отчет за 1985–1999 гг. пос. Полярный, 1999.
- Серавкин И.Б.* Эндогенная металлогения золота Урала (обзор, статья 1-я – Полярный, Приполярный, Северный и Средний Урал) // Геологический сборник. Информационные материалы. Ин-т геол. Уфимского отдел РАН. 2009. С. 164–176.
- Серокуров, Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В.* Дистанционная оценка золотоносного потенциала // Руды и металлы. 2008. № 1. С. 45–51.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удортина О.В. и др.* Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Ремизов Д.Н.* Островодужная система Полярного Урала (петрология и эволюция глубинных зон). Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 221 с.
- Томсон И.Н., Кравцов В.С., Кочнева Н.Т., Середин В.В., Селиверстов В.А.* Металлогения скрытых линейментов и концентрических структур. М.: Недра, 1984. 272 с.
- 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.
- Шанорев В.А., Капитанов А.Д., Шанорева Р.М. и др.* Геологический отчет “Анализ, обобщение и разработка методики интерпретации электроразведочных данных для картирования коллекторов и решения других нефтегазопроисловых задач в юго-западной части Сибирской платформы”. ПГО “Енисейгеофизика”. 1986, п. Геофизиков. 374 с.
- Шарпенко Л.Н.* Магматогенно-рудные системы континентальных вулcano-плутонических поясов подвижных областей // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 84–90.
- Шарпенко Л.Н.* Магматогенные кольцевые структуры. Л.: Недра, 1979. 231 с.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатови Н.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 – Воркута. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Яковлев Г.Ф.* Геологические структуры рудных полей и месторождений. М.: Изд-во Московского ун-та, 1982. 270 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. Jour. of Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958. DOI: 10.1039/CS9962500401.
- 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. DOI: 10.1080/01431160600606882.
- Claverie M., Jub J., Masek J.G. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // *Remote Sensing of Environment.* V. 219. 2018. P. 145–161.
- Doxani G., Vermote E., Roger J.C. et al. Atmospheric correction inter-comparison exercise // *Remote Sensing.* 2018. 10(2). 352 p.
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // *Jour. of Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The shuttle radar topography mission // *the American Geophysical Union.* 2007. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- 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 ed. 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 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.
- Li Z., Zhang H.K., Roy D.P. Investigation of Sentinel-2 bidirectional reflectance hot-spot sensing conditions // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2018. 10.1109/TGRS.2018.2885967. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8594675>).
- Loughlin W.P. Principal Component Analysis for Alteration Mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E. et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000 // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2006. 3(1). P. 68–72.
- 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. V. 510(3). P. 291–308. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.07.010
- 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. doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4
- Nezampour M.H., Rassa I. Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Min. Depos. Res.: Meeting the Global Challenge.* 2005. P. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6\_145
- Roy D.P., Li J., Zhang H.K. et al. Examination of Sentinel-2A multispectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 199. P. 25–38.
- Roy D.P., Zhang H.K., Ju J. et al. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 176. P. 255–271.
- 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.
- Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- 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. V. 51. No. 1. P. 31–41. doi.org/10.22146/ijg.37442
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *Jour. Teknologi Technoscianti,* 2017. 9(2).
- 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).
- Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I. Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *J. Geol. Soc. India.* 2017. V. 90. Is. 5. P. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0
- Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain analysis: principles and applications* // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A.A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian J. Geoscien.* 2018. 11:482. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x
- 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.
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // *Remote Sensing of Environment.* 2015. V. 159. P. 269–277.

# Prediction Perspective Areas for the Gold Mineralization Using the Methods of Mathematical Information Processing and the Data Set of Remote Sensing Satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the Polar Urals

J. N. Ivanova<sup>1,2</sup>, A. A. Bochneva<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

For the first time, for the SW part of the Malouralskaya zone of the Polar Urals, an approach was applied. The testing of which was obtained as a result of combining (1) methods of mathematical processing of information and (2) a set of data obtained by the Earth remote sensing spacecraft Harmonized Landsat Sentinel-2. The first one is based on the analysis of search features and their functional and correlation relationships. The second is the integration of maps of the distribution of hydrothermal alterations and the lineament density scheme, created on the basis of the results of statistical processing of remote sensing data. As a result of the study, two new areas were delineated and new predictive and prospecting features of gold mineralization were identified within the study area. (1) Areas promising for the gold mineralization type in the SW part of the Malouralskaya zone are localized along transregional fault zones that intersect favorable horizons and structures and control ore mineralization, and within the volcanic-tectonic structure (large morphostructure 40 × 45 km) of the 1st order. Within this depression, the accepted systems of modern volcanic structures of the 2nd and higher order, the position of which is controlled by junctions of NE- and NW-trending faults with a length of more than 10 km. (2) Potentially ore-bearing volcanic edifices show subsidence calderas and large area of metasomatic aureoles (more than 30 km<sup>2</sup>) with elevated indices of hydroxyl-(Al-OH, Mg-OH) and carbonate-bearing minerals and iron oxides and hydroxides (limonite) and, to a lesser extent, ferrous oxides.

**Keywords:** Earth remote sensing data, principal component method, digital elevation model, lineaments, faults, morphostructural map, the Polar Urals, Harmonized Landsat Sentinel-2, 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. Jour. of Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958. DOI: 10.1039/CS9962500401.
- Aerospace methods of geological research / Ed. A.V. Pertsova. St. Petersburg: VSEGEI, 2000. 316 p. (in Russian).
- 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).
- Benevolsky B.I., Volchkov A.G., Protsky A.G.* Prospects for creating an ore resource base for the gold mining industry in the Polar Urals region // *Mineral Resources of Russia. Economics and Management.* 2004. No. 2. P. 10–15. (in Russian).
- Bosikov I.I., Vyskrebets A.S., Tsidaev B.S., Belukov S.V.* Improving efficiency of appraisal, assaying and extraction of copper–nickel resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. (11–1). P. 40–53. (In Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-40-53.
- 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. DOI: 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. (in Russian).
- Claverie M., Jub J., Masek J.G. et al.* The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // *Remote Sensing of Environment.* V. 219. 2018. P. 145–161.
- Doxani G., Vermote E., Roger J.C. et al.* Atmospheric correction inter-comparison exercise // *Remote Sensing.* 2018. 10(2). 352 p.
- Dushin V.A., Malyugin A.A., Kozmin V.S.* Gold metallogeny of the Polar Urals // *Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. “Geology and Geography”.* 2002. No. 2. Is. 7. P. 72–81. 2. (In Russian).
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *Jour. of Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al.* The shuttle radar topography mission // *the American Geophysical Union.* 2007. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- Galiullin I.Z., Remizov D.N. et al.* Geological and mineralogical mapping (GMC) at a scale of 1:200,000 sheets Q-41-XYI, XYII, XXI, XXII (the Vostochno-Voykarskaya area). *Geological report // OJSC Polyarno-Uralskoye GGP. city of Labytnangi.* 2009. <http://geofond.3dn.ru>. (In Russian).

- Gitis G.V., Ermakov B.V.* Fundamentals of space-time forecasting in geoinformatics. M.: FIZMATLIT. 2004. 256 p. (In Russian).
- Gitis V.G.* Method of Approximation of Functional Dependencies Based on Expert Scores // Problems of Information Transmission. 1987. Volume XXIII. Iss. 3. P. 94–100. (In Russian).
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh. et al.* Osobennosti mineralogicheskoy zonal'nosti rudno-magmatischenkikh 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2014. V. 11. № 3. P. 140–156. (In Russian).
- 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 ed. 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. No. 1. DOI: 10.31857/S0205961423010062. (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. No. 4. P. 51–62.
- Ivanova Yu.N., Bochneva A.A.* Prediction perspective areas for the gold-copper-porphyry type of mineralization based on the analysis of prospecting features and their functional and correlation relationships // Geoinformatics. 2016. No. 2. P. 41–50. (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.* Deposits of ore gold Novogodnec-Monto and Petropavlovskoye – a new gold ore region in the Polar Urals // Exploration and protection of mineral resources. 2013. No. 11. P. 22–24. (In Russian).
- Krivko T.N., Zoloev K.K., Koroteev V.A.* New data on ore occurrences in the Rudnogornenskiy district and the probability of discovering industrial facilities of the “Novogodnenskiy type” (Polar Urals) // Gold and Technologies. 2014. No. 3(25). P. 14–17. (In Russian).
- Krivoguzova A.S., Vasyutenko D.M.* Analysis of the application of mathematical modeling in geology // Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant. Ser. Physico-mathematical and technical sciences. 2022. № 1. P. 101–107. (In Russian).
- Kucherina P.M. et al.* Report of the Haramatalou party on the objects: Production of a geological additional study on a scale of 1:50,000 of the area of the Rai-Iz massif and its framing. Sheets Q-41–46-B c, d, Q-41–47-A-a-3.4, c, d, C, D; Q-41–48-A and group geological survey of scale 1: 50,000 sheets Q-41–56-V-b, c, d, D; Q-41–57-A, B, C-a and geological additional study of sheets Q-41–56-A, B, C-a; Q-41–57-V-b, c, d, D-a, c, d within the northwestern region of the Voikar synclinorium, carried out in 1982–1991, pos. Polar, 1991. (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).
- Levochskaya 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).
- Li Z., Zhang H.K., Roy D.P.* Investigation of Sentinel-2 bidirectional reflectance hot-spot sensing conditions // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. 10.1109/TGRS.2018.2885967 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8594675>).
- Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Mansurov R.Kh.* Geological and structural conditions for the localization of Petropavlovsk gold deposit (the Polar Urals). Abstract dis. ... cand. geol.-miner. Sciences. Moscow, 2013. 22 p. (In Russian).
- Masek J.G., Claverie J., Ju M. et al.* Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E. et al.* A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000 // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. V. 3(1). P. 68–72.
- 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. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.07.010.
- 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. doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4.
- Melgunov A.N. et al.* Geological report “Prognostic assessment of the resource potential of the Northern, Subpolar and Polar Urals based on modern geological and geophysical, mineragenic,

- geochemical and isotope research methods". FSUE VSEGEI, St. Petersburg, 2008. Electronic version. (In Russian).
- Milovskii G.A., Rudakov V.V., Lebedev V.V. et al.* Application of satellite imagery to forecast gold mineralization in deep fault zones in the Northeast of Russia // *Issledovanie Zemli iz kosmos.* 2010. No. 3. P. 30–34. (In Russian).
- Milovsky G.A., Denisova E.A., Ezhov A.A., Kalenkovich N.S.* Prediction of mineralization in the Sob-Kharbeiskaya area (Polar Urals) based on cosmic geological data // *Issled. Earth from space.* 2007. No. 6. P. 29–36.
- Nezampour M.H., Rassa I.* Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Min. Depos. Res.: Meeting the Global Challenge.* 2005. P. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6\_145.
- Ovechkin A.M.* Prospecting for chromites in the northern part of the Voikaro-Syn'inskii hypermafic massif. Report for 1985–1999, settlement. Polar, 1999. (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).
- Roy D.P., Li J., Zhang H.K. et al.* Examination of Sentinel-2A multispectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 199. P. 25–38.
- Roy D.P., Zhang H.K., Ju J. et al.* A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 176. P. 255–271.
- Seravkin I.B.* Endogenous metallogeny of gold in the Urals (review, article 1 – Polar, Subpolar, Northern and Middle Urals) // *Geological collection. Information materials.* Geol Institute Ufa department of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 164–176. (In Russian).
- Serokurov, Yu.N., Kalmykov V.D., Gromtsev K.V.* Remote assessment of the gold-bearing potential // *Ores and metals.* 2008. No. 1. P. 45–51. (In Russian).
- Shaporev V.A., Kapitanov A.D., Shaporeva R.M. et al.* Geological report "Analysis, generalization and development of a methodology for interpreting electrical data for mapping reservoirs and solving other oil and gas prospecting problems in the southwestern part of the Siberian Platform". PGO "Yeniseigeophysics". 1986, p. Geofizikov. 374 p. (In Russian).
- Sharpenok L.N.* Magmatogenic-ore systems of continental volcano-plutonic belts of mobile areas // *Regional geology and metallogeny.* 2014. No. 58. P. 84–90. (In Russian).
- Sharpenok L.N.* Magmatogenic ring structures. Leningrad, Nedra, 1979, 231 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.
- Space information in geology* / Ed. A.V. Peive. Moscow: Nauka, 1983. 536 p. (In Russian).
- 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.
- Thomson I.N., Kravtsov V.S., Kochneva N.T., Seredin V.V., Seliverstov V.A.* Metallogeny of hidden lineaments and concentric structures. Moscow: Nedra, 1984. 272 p. (In Russian).
- Tommaso I., Rubinstein N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290. doi.org/10.22146/ijg.37442
- Vaganov V.I., Ivankin P.F., Kropotkin P.N.* Explosive ring structures of shields and platforms. M.: Nauka, 1985. 200 p. (In Russian).
- 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. V. 51. No. 1. P. 31–41. doi.org/10.22146/ijg.37442
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *Jour. Teknologi Technosci.* 2017. V. 9(2).
- 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. et al.* Gold-porphyry Petropavlovskoye deposit (Polyarny Ural): geological position, mineralogy and conditions of formation *Geology of Ruds. deposits* // *Geology of ore deposits.* 2017. V. 59. No. 6. P. 501–541.
- Volchkov A.G., Girfanov M.M., Novikov V.P.* Prospects for the development of the mineral resource base of gold in the Polar Urals (YaNAO) // *Problems of development of SMEs of solid fields. isp. in the Polar Urals.* Salekhard. 2007. P. 188–190. (In Russian).
- Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I.* Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *J. Geol. Soc. India.* 2017. V. 90. Is. 5. P. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0
- Wilson J.P., Gallant J.C.* Terrain analysis: principles and applications // *John Wiley & Sons.* 2000. 520 p.
- Yakovlev G.F.* Geological structures of ore fields and deposits. M.: Moscow University, 1982. 270 p.
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A.A.* Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian J. Geosci.* 2018. 11:482. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x

- 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.
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E.* Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // *Remote Sensing of Environment.* 2015. V. 159. P. 269–277.
- Zverev A.T., Gavrilova V.V.* Development of the theory and methods for assessing and forecasting the state of natural resources using space images. *Izv. universities. Geodesy and aerial photography.* 2012. No. 5. P. 44–47. (In Russian).
- Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baeza A.* Prediction of ore mineral deposits in Chile based on lineament analysis of space images // *Izv. universities. Geodesy and aerial photography.* 2005. No. 6. P. 62–69. (In Russian).
- 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).