
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА
ЗОЛОТОРУДНЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ, ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОБРАБОТКИ
НАБОРА ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ HARMONIZED LANDSAT SENTINEL-2
ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО ОКОНЧАНИЯ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА
ПОЛЯРНОГО УРАЛА**

© 2024 г. Ю. Н. Иванова^{1,2}

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

²*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

Впервые для северного окончания восточного склона Полярного Урала применен подход к обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), полученных космическим аппаратом Harmonized Landsat Sentinel-2. Рассматриваемый подход заключается в интеграции карт распределения гидротермальных изменений и схемы плотности линеаментов, созданных на основе результатов статистической обработки мультиспектральных данных ДЗЗ, а также цифровой модели рельефа Aster GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). Работа проведена с целью выявления морфологических признаков и закономерностей, особенностей глубинного строения для выделения площадей, перспективных на золоторудный тип минерализации. В результате проведенного исследования околонтурены две новые перспективные площади и выделены дополнительные прогнозно-поисковые критерии золотого оруденения: (1) установлено, что площади, перспективные на золоторудный тип минерализации, следует искать вдоль трансрегиональных разломных зон, которые пересекают благоприятные горизонты и структуры и контролируют рудную минерализацию, а также по периферии крупной (97 на 76 км) чашеобразной гетерогенной вулcano-плутонической структуры 1-го порядка с длительной историей развития, локализованной над внутрикоровыми магматическими камерами; (2) морфоструктура должна быть осложнена кольцевыми и дуговыми структурами 2-го и более высоких рангов, а также разрывными нарушениями СЗ и СВ простирания протяженностью более 10 км, либо ослабленными зонами, вдоль которых фиксируются внедрения интрузивных тел, парагенетически связанных с минерализацией; (3) в потенциально рудоносных вулканических постройках должны быть проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксидов трехвалентного железа (гематит), оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов двухвалентного железа.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, метод главных компонент, цифровая модель рельефа, линеаменты, разрывные нарушения, морфоструктурная карта, Полярный Урал, Harmonized Landsat Sentinel-2, схема плотности линеаментов

DOI: 10.31857/S0205961424060029, **EDN:** RQYLNJ

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время Арктика привлекает повышенное внимание ученых по всему миру. Все больше научных изысканий проводятся для данного региона, в том числе в виду установленных объемных запасов полезных ископаемых (ПИ) различных типов. При этом территория является плохо изу-

ченной из-за наличия снежно-ледяного покрова, сохраняющегося большую часть года, метеорологических условий, затрудняющих получение качественных снимков, а также сложности последующей обработки принятых к учету месторождений. Поэтому решение многих специфических задач в Арктической зоне Российской Федерации, вклю-

чая постановку прогнозно-поисковых работ, оценку перспектив рудоносности, может быть реализовано за счет использования методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они обладают большой обзорностью, обеспечивают множество преимуществ для реализации исследовательских и опытно-конструкторских проектов, позволяют проводить широкомасштабные и относительно рентабельные наблюдения, а также осуществлять сбор данных в регионах с ограниченной инфраструктурой (Bohlmann, Koller, 2020; Миловский и др., 2021).

В предыдущей работе (Иванова, Выхристенко, 2021) для Щучинской зоны (ЩЗ), являющейся

наиболее перспективной на выявление золоторудной минерализации, проведен анализ изображений с космического аппарата (КА) ДЗЗ Landsat 8, представлены результаты морфоструктурного картирования данной территории и получена морфоструктурная модель Щучинского палеовулкана. Кроме того, сформулирован геолого-морфологический прогнозный критерий для золотого оруденения, который может быть использован при постановке геологоразведочных работ в других районах Полярного Урала и северных широтах.

Цель – построить прогнозную карту ЩЗ и прилегающей территории, полученную на основе:

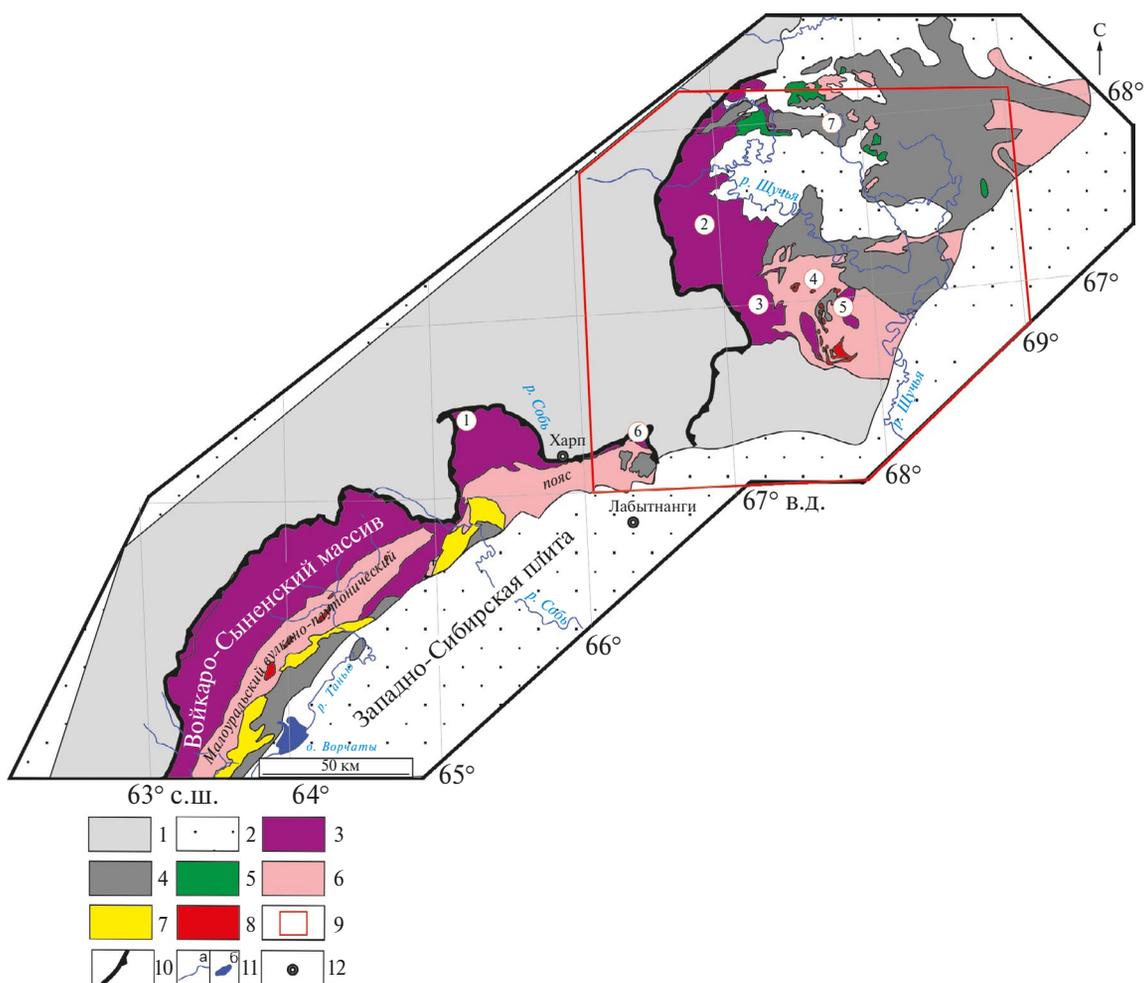


Рис. 1. Тектоническая схема Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–8 – Восточно-Уральская мегазона (Щучинская зона локализована выше 66030' в.д. и Войкарская – ниже 66020' в.д.): 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагиогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юньягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монцодиориты конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменского и янослорского комплексов; 9 – границы изучаемой территории; 10 – ГУР; 11 – основные реки и озеро; 12 – города. Цифрами показаны: 1–5 – массивы Рай-Из (1), Сыум-Кей (2), Масловский (3), Юньягинский (4), Хоростоский (5), Собское поднятие (6), хребет Янганапэ (7).

(1) карты развития гидротермально-метасоматических пород, (2) прогнозной схемы распределения зон высокопроницаемых горных пород на золоторудный тип минерализации, составленных в результате обработки данных сцен космических снимков (КС) КА ДЗЗ Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2). Помимо этого, будут учтены данные геологической карты, карты дочетвертичных отложений, карты распределения ПИ, схемы прогноза ПИ и продуктивности рудных районов и узлов и геофизической информации для оконтуривания перспективных участков, выделения новых прогнозно-поисковых критериев и выявления геологических/морфологических особенностей изучаемой площади на золоторудный тип минерализации в пределах исследуемой территории.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

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

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

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

В строении ЩЗ выделяют несколько сегментов, в пределах которых установлены: палеозойские покровно-складчатые сооружения, представленные породами ордовика, силура, девона, карбона, перекрытые платформенными мезозойскими отложениями юры и триаса. Наиболее широкое развитие среди плутонических образований получили габброиды, гранитоиды имеют значительно меньшее распространение и локализованы в виде небольших штокообразных массивов площадью до 10–16 км² (Душин, 2020) (рис. 2).

С породами некоторыми свит и комплексов связана разнообразная рудная минерализация. Например, с магматическими и вулканогенно-осадочными породами основного состава ваське-

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

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

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

Войкарская зона имеет субмеридиональное ССВ простирание и представляет собой ряд аллохтонов, полого погружающихся в ВЮВ направлении. Зона существенно тектонизирована и разбита надвигами на отдельные пластины. Аллохтоны состоят из вулканогенных и терригенно-вулканогенных пород палеозойского возраста океанического и надсубдукционного происхождения. Подошва аллохтонов (в западной части Войкарской зоны) ограничена ГУР. Восточная часть зоны сложена ранне-среднепалеозойскими и позднедокембрийскими блоками в различной степени метаморфизованных ультраосновных и основных пород офиолитовой ассоциации. Эти блоки слагают горные массивы Рай-Из

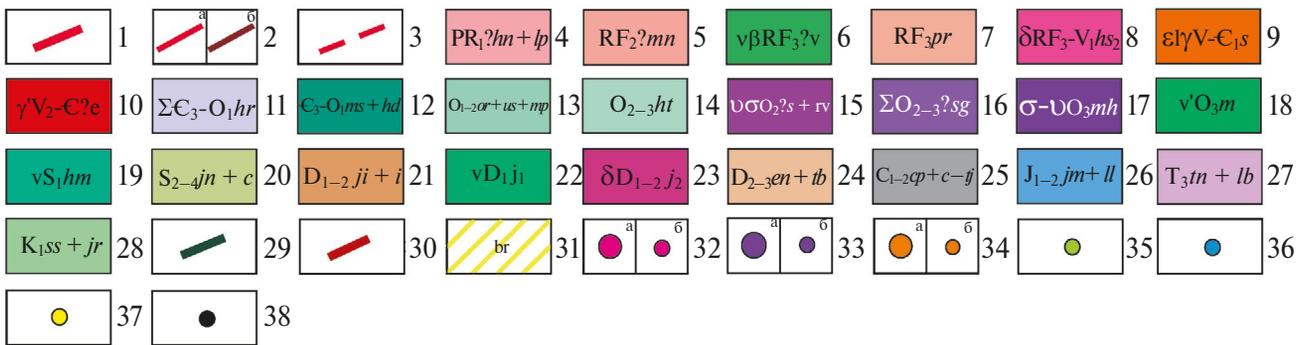
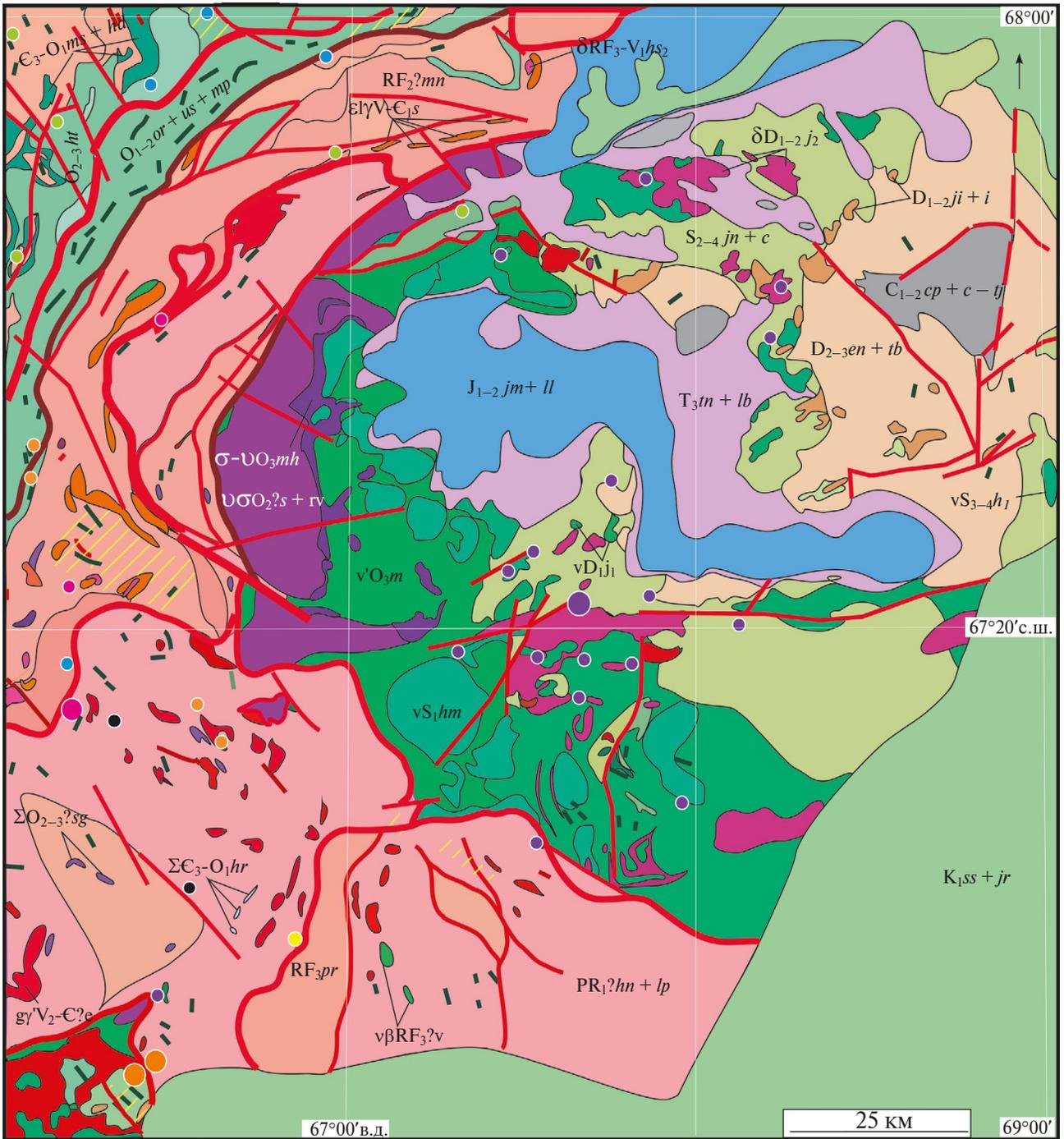


Рис. 2. Упрощенная геологическая карта изучаемой территории по (Зылева и др., 2014): 1-2 – достоверные разрывные нарушения: 1 – шарьяж, 2 – надвиг и взбросо-надвиг (а), рудоконтролирующие (б), 3 – предполагаемые разрывные нарушения: надвиги, взбросо-надвиги и поддвиги, 4–28 – свиты, толщи и комплексы: 4 – объединенные ханмейхойская и лаптаюганская свиты, содержащие амфиболиты с гранатами, прогнейсы, реге гнейсы, линзы мраморов, железистые кварциты и гондиты; 5 – минисейшорская свита, включающая метабазалты, углеродисто-серицит-кварцитовые филлитовидные, хлорит-серицит-альбит-кварцевые сланцы, прослои метапесчаников и метаалевролитов; 6 – васькеуский комплекс со штоками и дайками метагаббродолеритов; 7 – париквасьшорская свита с кристаллосланцами, сланцами и плагиогнейсами; 8 – харбей-собский комплекс с диоритами и кварцевыми диоритами; 9 – сядатаяхинский комплекс с гранитами и монцогранитами, дайками гранитов; 10 – евьюганский комплекс с метагранитами и метааляситами; 11 – хартманюшорский комплекс с дайками серпентинитов; 12 – объединенные минисейская и хойдышорская свиты с конгломератами, песчаниками, гравелитами, алевролитами и кварцитами; 13 – объединенные орангская, усинская и малопайпудынская свиты, включающая филлиты, углеродисто-кварцевые сланцы, алевролиты, конгломераты, гравелиты, прослои и линзы алевритов, песчаники, мраморизованные и алевритистые известняки, толеитовые базальты; 14 – хантейская свита с мраморизованными известняками, сланцами и алевролитами; 15 – объединенные сьум-кеуский и райизко-войкарский комплексы с дунитами, лерцолитами, гарцбургитами; 16 – слюдяногорский комплекс с метаяльтрамафитами; 17 – малохада-тинский комплекс, включающий верлиты, дуниты, клинопироксениты и вебстериты; 18 – малыкский комплекс с метагаббро, апогаббровыми амфиболитами; 19 – харампэйско-масловский комплекс, содержащий габбро и габбронориты; 20 – объединенные янганапэйская и карбонатная толщи с базальтами, андезитобазальтами, дацитами, риодацитами, плагиориолитами и их туфами, прослоями и линзами песчаников, гравелитов, известняков, конгломератов; 21 – объединенные кремнисто-известняковая и известняковая толщи, включающие слоистые известняки, конгломераты, брекчии и линзы бокситов; 22–23 – первая и вторая фазы юньягинского комплекса с габбро, диоритами и гранодиоритами; 24 – объединенные енэорская и тальбейская толщи с песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами, гравелитами, прослоями и линзами известняков, радиоляритов, лав трахибазальтов, линзами пепловых туфитов; 25 – объединенные карбонатно-песчаниковая, карбонатная и терригенно-известняковая толщи с известковистыми песчаниками, аргиллитами, алевролитами, конгломератами, гравелитами, известняками, единичными линзами мергелей и пепловых туфитов; 26 – объединенные яны-маньинская и тольинская свиты с песками, гравийниками, галечниками, конгломератами и пластами бурых углей; 27 – объединенные теунтойская и лаборовская свиты с пестроцветными песками, алевролитами и конгломератами; 28 – объединенные северососьвинская и яронгская свита, включающие пески, песчаники, алевролиты с прослоями алевролитовых и углистых глин и пластами бурых углей; 29–30 – разнообразные внемасштабные тела даек основного (29) и кислого (30) состава, с которыми связаны проявления Mo, Au, As и Cu минерализация; 31 – зона березитизации; 32–38 – месторождения (а), рудопроявления и пункты минерализации (б): 32 – Mo, 33 – Fe, 34 – Au, Au–Fe, 35 – Cu, 36 – Pb–Zn, 37 – As–Mo–Au, 38 – Ti. Примечание: цифрой 1 обозначено Юньягинское месторождение (пояснение см. в тексте).

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

Более подробное геологическое описание ЩЗ можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Зылева и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Душин, 2020; Пучков, Иванов, 2020 и др.).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Безоблачные дневные сцены КА HLS-2:

– HLS.S30.T41WPQ.2022212T071619 (31.07.2022 г. в 07:20:51);

– HLS.S30.T41WPR.2022212T071619 (31.07.2022 г. в 07:20:37);

– HLS.S30.T41WVA.2021187T071619 (18.07.2021 г. в 07:16:19);

– HLS.S30.T42WVW.2020205T070631 (23.07.2020 г. в 07:10:50).

Изображения получены из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных Д33 (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) для получения высокочастотных изображений с целью мониторинга поверхности Земли и проведения различных прикладных исследований. Данные доступны на Интернет-ресурсе www.search.earthdata.nasa.gov (Masek et al. 2018).

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

Геологическая информация представлена: (1) геологической картой дочетвертичных образований, (2) картой ПИ и закономерностей их размещения (масштабы карт 1:1000000, листы Q-42), (3) схемой прогноза ПИ и продуктивности рудных

районов и узлов доплиоценовых образований (масштаб карты 1:1000000, лист Q-42). Данные материалы составлены в рамках госзадания Института Карпинского в 2014 г. (Зылева и др., 2014).

Геофизические данные получены по результатам: (1) комплексной аэрогеофизической съемки ЦЗ, включающей аэромагниторазведку, аэроэлектроразведку дипольного индуктивного профилирования и аэрогамма-спектрометрию, выполненную АО «ГНПП «Аэрогеофизика» в 2006–2009 гг. по госзаказу для составления геофизической основы в зоне проектируемой железной дороги Ивдель-Лабитнанги (Калмыков, Трусков, 2015). Съемка проводилась в масштабе 1:50000; (2) схемы предварительной комплексной интерпретации геофизических материалов, составленной Институтом Карпинского (Красинский, Кудряшов, 2011) (масштаб 1:1000000, лист Q-42).

Интерпретация геофизических полей проводилась с целью подтверждения и уточнения внешних контуров морфоструктур и структурных элементов.

Для выделения линейных линеаментов использовалась глобальная цифровая модель рельефа

(ЦМР) Aster GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) с пространственным разрешением в плане 30 м (Farr et al., 2007; Полякова и др., 2020), охватывающая исследуемую территорию. Данная ЦМР покрывает поверхность суши между 83° с.ш. и 83° ю.ш. и насчитывает 22600 фрагментов размером 1°×1°. Данные Aster GDEM бесплатны и доступны через EarthData (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ЦЗ по данным геофизических исследований имеет дугообразную форму в плане с повышенными значениями магнитного поля и поля силы тяжести, приуроченными к ее периферийным частям в соответствии с развитыми здесь комплексами плутогенных формаций гипербазитов и габброидов (рис. 3 а, б).

Внутренние и восточные области структуры характеризуются равномерным потенциальным полем и их пониженным уровнем, что обусловлено

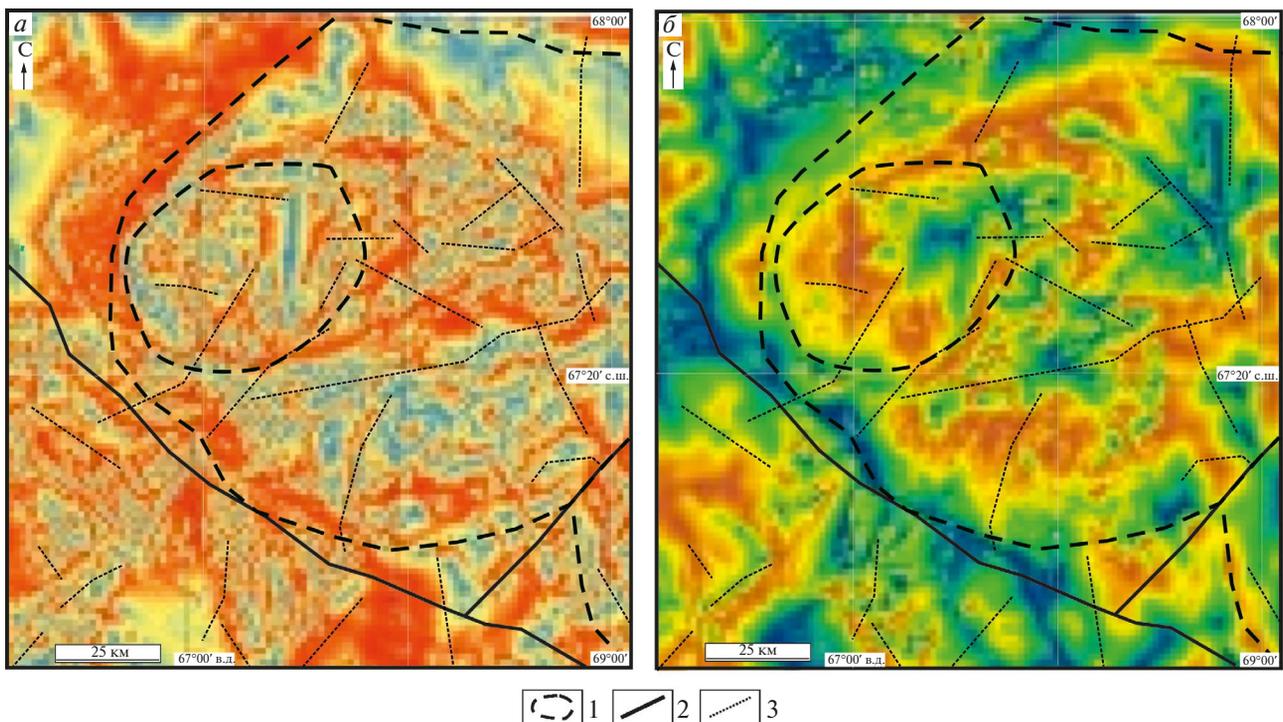


Рис. 3. Карты TILT-трансформанты аномального магнитного поля (а) и поля силы тяжести (б) (по Литвинов, Кудрявцев, 2011): 1 – кольцевые и дуговые структуры, выделенные по трансформанте TILT аномалий гравитационного поля, 2 – линии нарушения геофизических аномалий, предположительно ассоциируемых с глубинными разломами (разрывные нарушения 1-го порядка), 3 – линии нарушения корреляций, предположительно связанные с разрывными нарушениями 2-го порядка (вынесены разрывные нарушения протяженностью более 10 км). Примечание: шкала раскраски значений приведена в условных единицах от -1.75 до 1.75 , где красный цвет соответствует минимальным значениям, а голубой – максимальным (а), красный цвет – максимальным значениям, синий – минимальным (б).

развитием палеозойских вулканогенно-осадочных и осадочных комплексов, а также присутствием наложенных мезозойских впадин, выполненных мощной толщей терригенных осадков (рис. 4).

Из региональных структур в геофизических полях отчетливо выделяется крупная Ханмей-Сибилейская зона разломов, которая протягивается в СВ направлении через всю исследуемую территорию (Калмыков, Трусов, 2015).

Ханмей-Сибилейская зона проявляется также в рельефе главной магнитоактивной поверхности, которая характеризует морфологию кровли палеозойского фундамента. Зона имеет глубинное заложение и развивалась в течение палеозоя и мезозоя. Вероятно, она является рудоконтролирующей. К ее ЮЗ окончанию приурочено золоторудное месторождение Новогоднее-Монто, а в пределах Щучьинской структуры с ней пространственно связан Юньягинский рудный узел (Калмыков, Трусов, 2015).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Abdullah et al., 2010; Thannoun, 2013; Миловский и др., 2021; Выпядин, Бондарь, 2021; Иванченко и др., 2022), выделения кальдер (Verdiansyah, 2017, Ананьев, 2017; Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализация (Hubbard et al., 2012; Лесняк и др., 2022; Коротков, 2023) и др.

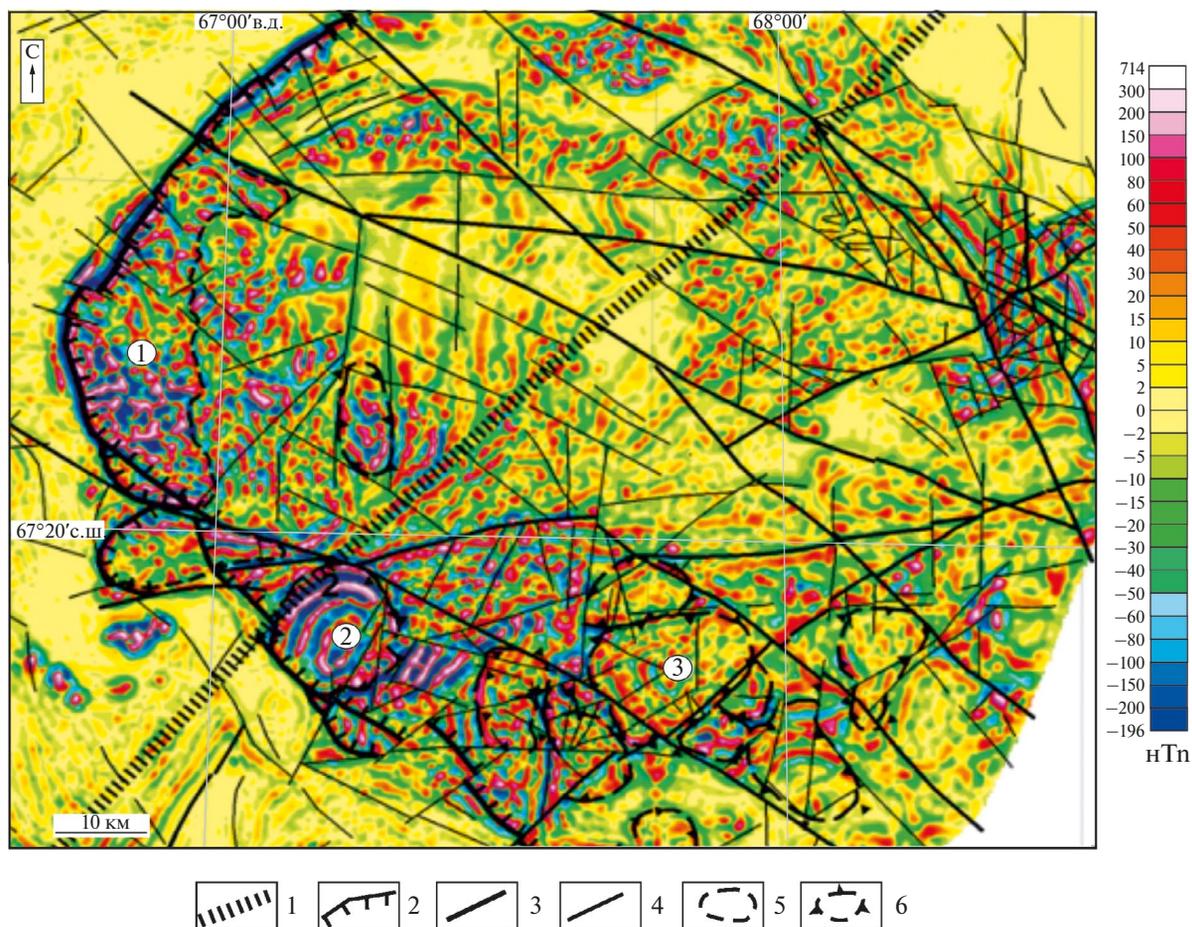


Рис. 4. Внутреннее строение Щучьинского синклиория в локальной составляющей магнитного поля (по Калмыков, Трусов, 2015): 1 – Ханмей-Сибилейская зона разломов, 2 – ГУР, 3–4 – разломы: главные (3), второстепенные (4), 5–6 – контуры интрузивных массивов: сьум-кеуский (5), харампэйско-масловский (6). Цифрами показаны интрузивные массивы: 1 – Сьум-Кеу, 2 – Масловский, 3 –Хоростоский.

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

На основе ЦМР в программе QGIS выделены дополнительные линейные линеаменты рельефа (вытянутые в плане уступы горных хребтов, спрямленные участки речных долин и русел рек), которые не дешифрируются на КС (Wilson, Gallant, 2000; Иванченко и др., 2022). Данные ЦМР визуализированы с помощью техники “теневой рельеф” с целью дальнейшего построения схемы плотности линеаментов и прогнозирования перспективных участков на золоторудный тип минерализации.

Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля метасоматически-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в диапазоне датчика КА ДЗЗ. Поэтому для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц (Mauger, 2013; Коротков, 2023) широко используется метод соотношения полос (band ratios). Данный метод усиливает спектральные особенности пикселей изображений на основе вычисления отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Выбор подобных каналов производится исходя из отражающей способности искомого минерала. При этом в числителе должен располагаться канал, характеризующий 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, гётит, 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) Fe³⁺, Fe²⁺, Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH и Si-OH групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

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

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*

Примечание: для характеристик: * – OLI, ** – MSI.

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

В качестве входных данных для МГК традиционно выступают спектральные каналы КС, но для наиболее эффективной статистической оценки на-

дежности пространственного распределения соответствующих гидротермальных минералов в исследуемом районе использованы результаты оценки минералогических индексов с применением ковариационной матрицы.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

По геологической информации (см. рис. 2), геофизическим данным (см. рис. 3, 4, 6б) и анализу КС (рис. 6а) и ЦМР (рис. 5) отчетливо выделяется ГУР.

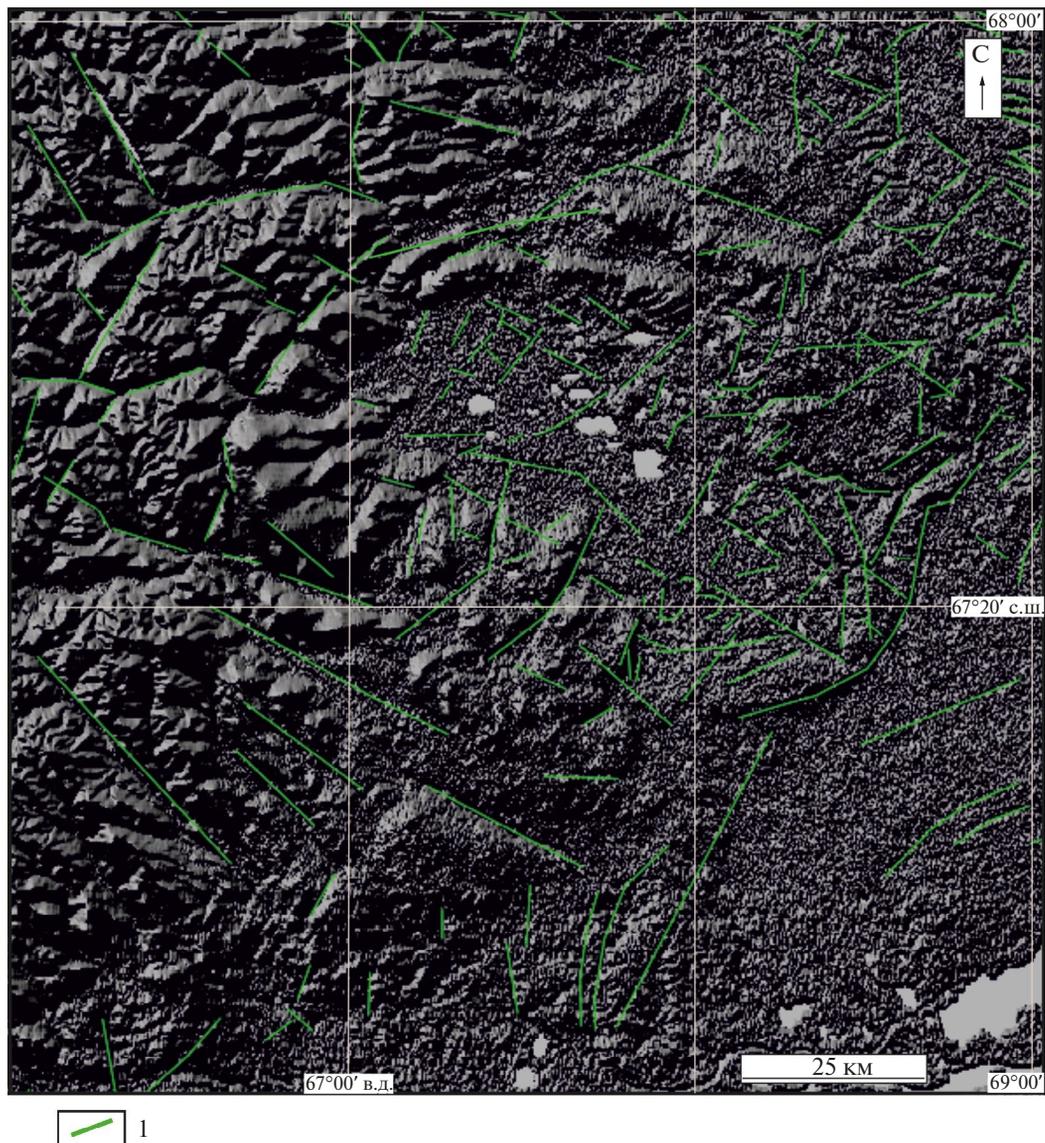


Рис. 5. ЦМР и выделенные по ней линеаменты для территории исследования: 1 – линеаменты.

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 полистадийным развитием (Зылева и др., 2014).

В период развития ГУР, вероятно, возникали разномасштабные магматические образования, формировавшие концентрические структуры, наложенные на складчатость, которые играли ведущую роль в локализации минерализации (Космическая информация..., 1983).

Ориентировка линеаментов оценивается по розе-диаграмме, которая отражает направление линеаментов по площади изображения. В результате выделены основные направления структур (рис. 6в). Главные структуры – это линеаменты СВ и СЗ ори-

ентировки. Второстепенные – субширотного простирания. Субпараллельные радиальные разрывные нарушения СВ ориентации относятся к ГУР. При этом СЗ, вероятно, являются более древними, так как они пересекают кольцевые структуры и линеаменты СВ направления как с разрывами и смещениями отдельных частей, так и без (Космическая информация..., 1983; Лесняк и др., 2022).

На КС КА ДЗЗ HLS-2 (см. рис. 6а) и ЦМР (см. рис. 5) уверенно выделяется кольцевая морфоструктура овальной формы 1-го порядка (Щучьинский палеовулкан – ЩП) размером 97 на 76 км. В ее строении участвуют дуговые и радиальные структуры 2-го и более высоких рангов.

Центральная часть ЩП сложена осадочными породами объединенных яны-маньинской и тольинской, теунтойской и лаборовской свит, а так-

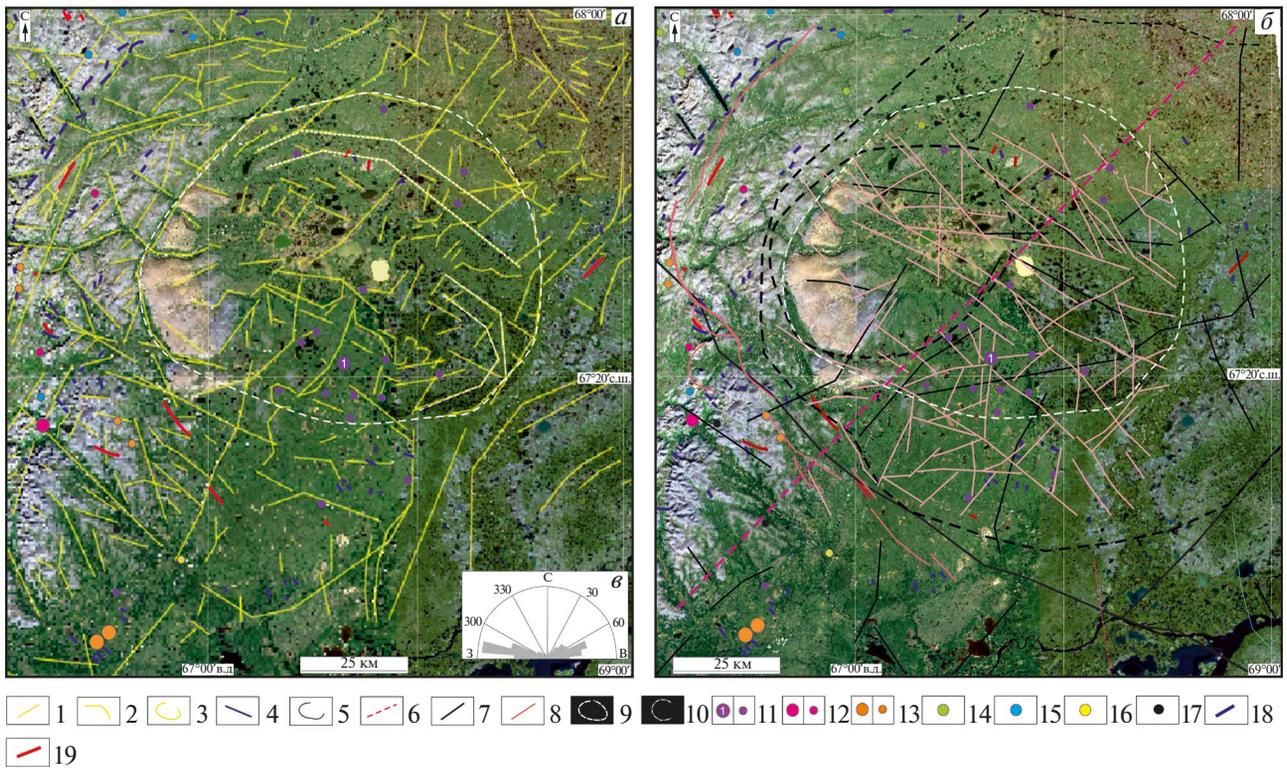


Рис. 6. Морфоструктурная карта площади исследования, полученная по данным КС КА HLS-2 и ЦМР (а) и КС КА HLS-2 в естественных цветах (RGB 4-3-2) с наложенными на них структурами, вынесенными со схемы предварительной комплексной интерпретации геофизических материалов по (Калмыков, Трусов, 2015) и с карты аномалии магнитного поля палеозойских комплексов Щучьинского синклиория по (Литвинов, Кудрявцев, 2011) (б): 1–3 – линеаменты радиальные и дуговые, кольцевые, полученные по КС КА HLS-2 и ЦМР (3), 4–8 – структуры, выделенные по геофизическим данным: 4 – ГУР, 5 – кольцевые и дуговые, выделенные по трансформанте ТПТ аномалии гравитационного поля (АГП), 6 – Ханмей-Сибилейская зона разломов; 7 – линии нарушения корреляции геофизических аномалий, предположительно ассоциируемых с глубинными разломами (разрывными нарушениями 1-го порядка); 8 – линии нарушения корреляции, предположительно связанные с разрывными нарушениями 2-го порядка, на карту вынесены линеаменты протяженностью более 10 км; 9 – палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка), 10 – дуговые структуры 2-го порядка; 11–17 – соответствуют рис. 2, 18–19 – дайки основного (19) и кислого (б) состава. Роза-диаграмма составлена для линеаментов, выделенных ручным способом по КС КА HLS-2 и ЦМР (в).

же вулканогенно-осадочными породами кислого и основного состава янганапэйской и карбонатной толщ. Янганапэйские субвулканические образования вмещают проявления Fe-скарнового типа, включая месторождение Юньягинское (см. рис. 2 и 5а), и Si минерализацию, а на контакте малых плутонических и вулканических тел кислого состава с карбонатной толщей локализуется скарново-магнетитовое оруденение.

Во внешнюю часть морфоструктуры помимо вышеуказанных свит и толщ входят породы:

– малохадатинского и сыум-кеуского комплексов, сложенных УО магматическими породами. С породами комплексов пространственно и генетически связаны проявления Cr;

– харампэйско-масловского, юньягинского (первая и вторая фазы) и малыкского комплексов, состоящих из магматических пород основного состава. С породами первой фазы юньягинского комплекса связаны проявления V-Ti-Fe-рудной ультрамафит-мафитовой формации, а со второй – проявления и месторождения Cu-Fe-рудной скарновой формации;

– тальбейской, янганапэйской и карбонатной толщ, сложенные вулканогенно-осадочными породами основного состава; янганапэйские субвулканические образования вмещают проявления Fe-скарнового типа и Si минерализацию, в карбонатной толще локализуются скарново-магнетитовое оруденение.

ЩП по типизации (Шарпенюк, 1974, 2014) принадлежит к вулканоплутоническому типу по следующим признакам:

1. Большие размеры структур (более 60 км в диаметре) и магмогенерация происходила на глубине около 30 км (или ниже?) – в нижних частях земной коры (Ваганов и др., 1985 и Аэрокомические..., 2000; Иванова, Выхристенко, 2021).

2. Чашеобразная форма (мульда-впадина). ЩП в разрезе объемной модели магнитной восприимчивости представляет собой чашеобразную форму с падением магнитных обособлений к ее центру. ЮЗ граница массива резкая, падает под углом 50° на СВ, что позволяет связывать ее с надвиговыми структурами системы ГУР (Калмыков, Трусков, 2015).

3. Длительное время формирования и сложное внутреннее строение.

Вероятнее всего, в процессе застывания магмы осуществлялось перераспределение вещества при образовании минеральных форм, и возникла магматогенная расслоенность. При поступлении новых порций магматического материала происхо-

дило частичное переплавление пород, усложнение внутренней структуры массивов и формирование массивов сателлитов. Далее происходило застывание магмы с образованием трещин отдельности и завершение формирования структуры комплексов. На более поздних этапах усложнялась форма массивов, разрушались уже застывшие массивы в результате наложенных метаморфических и тектонических процессов (Уэйджер, Браун, 1970; Шарков, 2006; Калмыков, Трусков, 2015).

Внутреннее строение палеовулкана осложнено (1) линеаментами СВ и СЗ простирания (более 10 км), либо ослабленными зонами (1-го порядка), вдоль которых фиксируется внедрение разнообразных интрузивных тел (дайки основного и кислого состава). (2) Кольцевыми и дуговыми линеаментами 2-го и более высоких рангов, корового уровня заложения (Горный и др., 2014). Такие структуры формировали малоглубинные очаги с разнообразной рудной специализацией (Томпсон и др., 1984; Серокуров и др. 2008 и др) (см. рис. 5а).

Данная морфоструктура реконструирована как кальдера проседания. Общими особенностями механизма формирования подобных 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 подобные кальдеры имеют изометричную форму, а ее границы маркируются кольцевыми, полукольцевыми, дуговыми и радиальными разрывными нарушениями (Яковлев, 1982).

Скорее всего, формирование золоторудных и комплексных месторождений, происходило в результате развития внутрикоровых гидротермально-метасоматических систем, концентрирующих рудную минерализацию. В результате при распаде таких систем в верхних слоях земной коры возникали преимущественно непротяженные по вертикали (не более 2 км) и небольшие по объемам прерывистые колонны рудных тел (Ананьев, 2017).

Кроме того, в потенциально рудоносных вулканических постройках должен быть проявлен метасоматический ореол значительной площади (более 30 км²). На площадях, где из-за наличия перекрывающих толщ, либо более поздних осадочных комплексов, либо экранирующего слоя менее проницаемых вулканических пород метасоматический ореол может быть проявлен и на более меньшей площади (до 10 км²) (Левочская и др., 2021; Gray, Coolbaugh, 1994).

Другими признаками потенциальной рудоносности отдельно взятых вулканических построек могут служить проявления зон с повышенными

значениями индексов оксида железа II и III, реже гидроксил- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа КС. Данные индексы выявлены для Центральной части Малоуральской зоны в работе (Иванова, Нафигин, 2023).

В результате для изучаемой территории впервые закартированы 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов, раздельно и совместно показанные на рис. 7 и 8.

Как видно из рис. 7 распределения оксидов трехвалентного железа (гематит) и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), особенно с высоким содержанием, в целом совпадают. При этом наибольшее скопление средних и высоких концентраций локализовано на СЗ части территории. В меньшей степени совпадает расположение повышенных значений гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов двухвалентного железа (магнетит), локализованных в центральной, южной и ЮВ частях площади.

Это можно объяснить наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных ком-

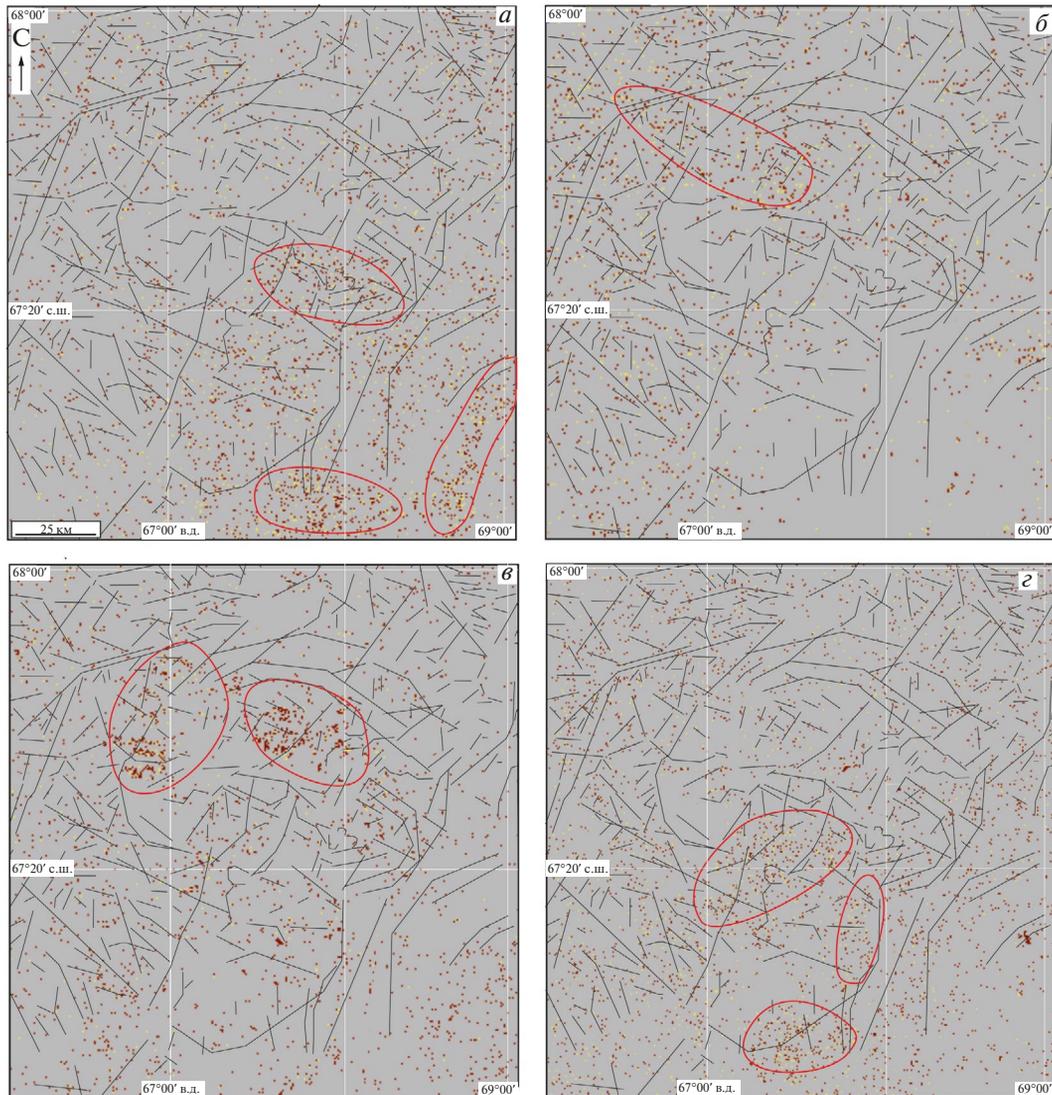


Рис. 7. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой территории, полученные в результате обработки КС КА HLS-2: *а* – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, *б* – оксиды трехвалентного железа (гематит), *в* – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), *г* – оксиды двухвалентного железа (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.

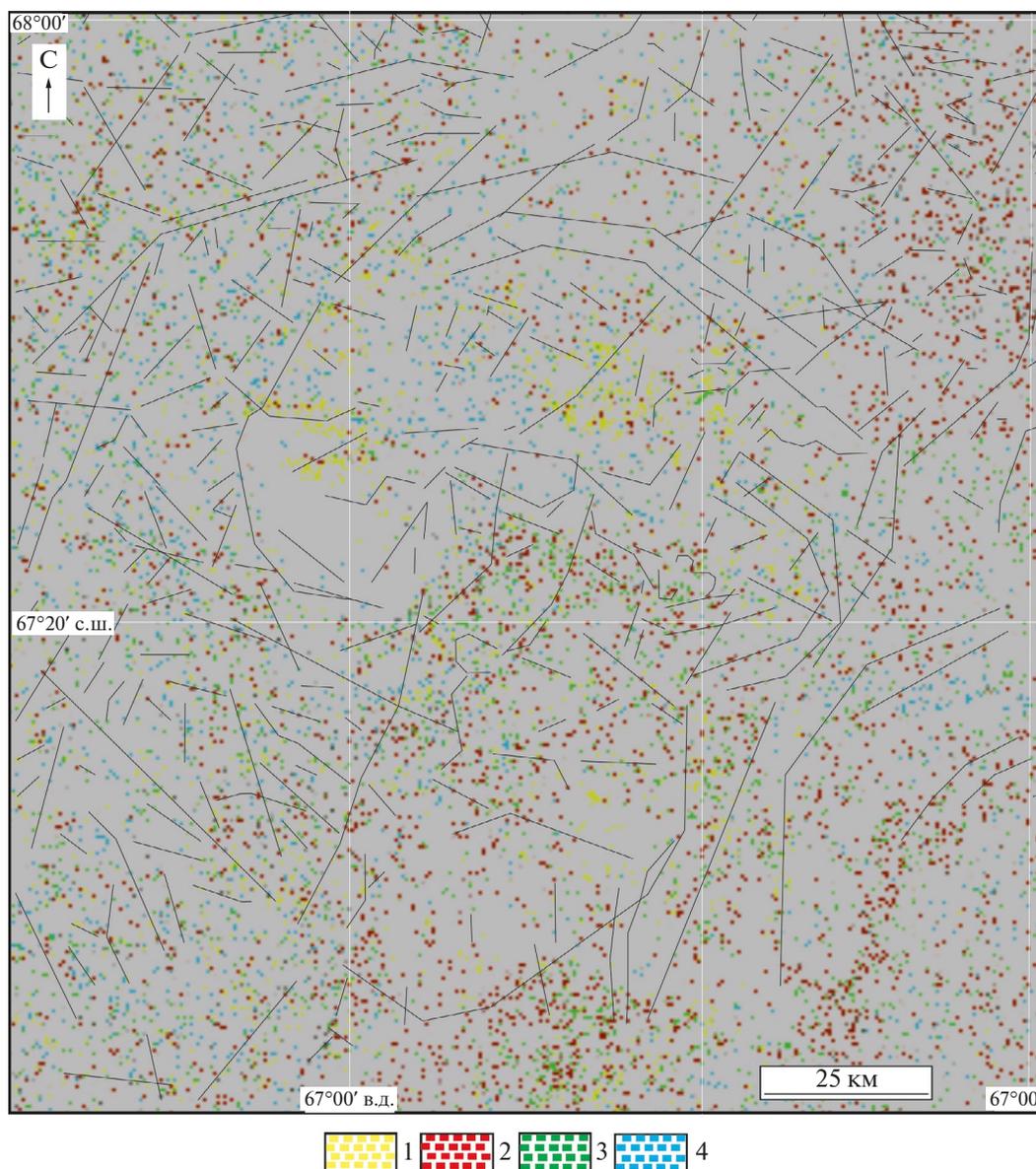


Рис. 8. Объединенная схема развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой территории в результате обработки КС КА ДЗЗ HLS-2. 1 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), 2 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы, 3 – оксиды двухвалентного железа (магнетит), 4 – оксиды трехвалентного железа (гематит).

плексов, например, объединенных яны-маньинской и тольинской, теунтойской и лаборовской свит, в меньшей степени – северососьвинской и яронгской свит, представленные разнообразными осадочными породами (пески, гравийники, галечники, конгломераты, пласты бурых углей, алевриты, песчаники, углистые глины, глины) мощностью до 450 м.

На рис. 9 представлена схема плотности линеаментов для изучаемого района и прилегающей территории с наложенными на нее гидротермальными изменениями, полученными на основе обработки

данных КС КА HLS-2. 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, играющие рудоконтролирующую роль. Ряд рудопроявлений локализованы в зонах с низкими концентрациями структур (зеленый цвет). Это связано, вероятно, также с наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов.

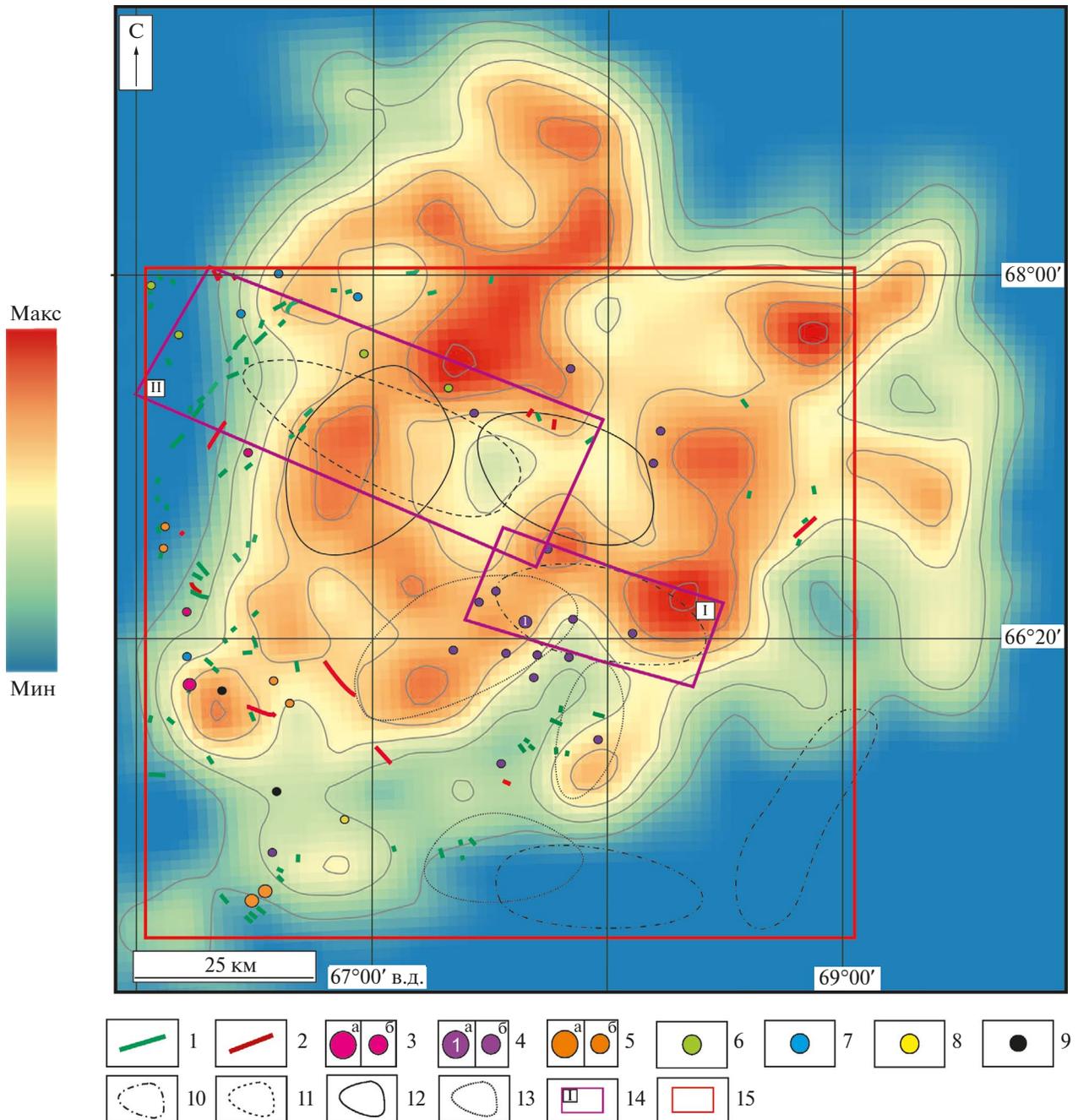


Рис. 9. Схема плотности построена на основе линеаментов, выделенных ручным способом, для изучаемой и прилегающей территории с нанесенными перспективными участками на золоторудный тип минерализации: 1–9 – соответствуют рис. 2; 10–15 – вторичные изменения: 10 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, 11 – оксиды трехвалентного железа (гематит), 12 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), 13 – оксиды двухвалентного железа (магнетит), 14–15 – границы: 14 – площадей, выделенных по материалам КС КАДЗЗ HLS-2 (номера I-II на карте – см. пояснения в тексте), 15 – изучаемой территории. На шкале показаны зоны с максимальной (красный цвет) и минимальной (синий цвет) плотностью линеаментов.

Учитывая следующие признаки:

1. Геологические особенности: расположение крупной гетерогенной чашеобразной вулканоплутонической структуры вдоль трансрегиональной разломной зоны высшего ранга, осложненной ду-

говыми, кольцевыми и радиальными разрывными нарушениями более высшего ранга, вдоль которых локализованы субвулканические тела, с которыми генетически связана минерализация (Шарпенюк, 1974).

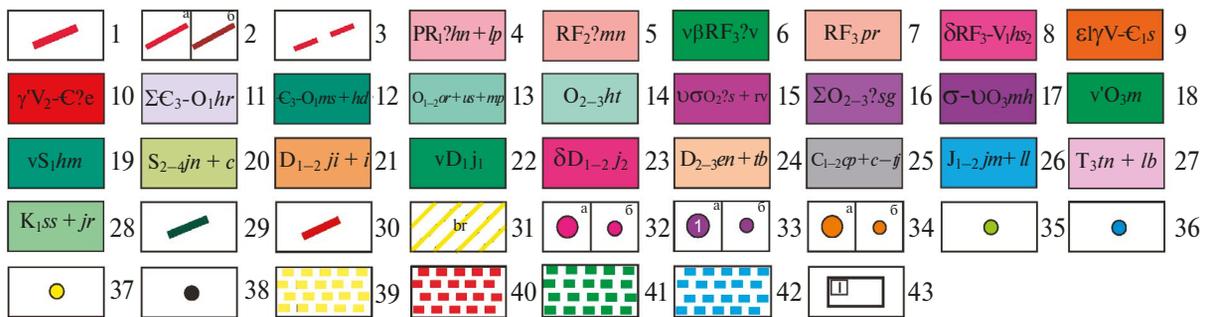
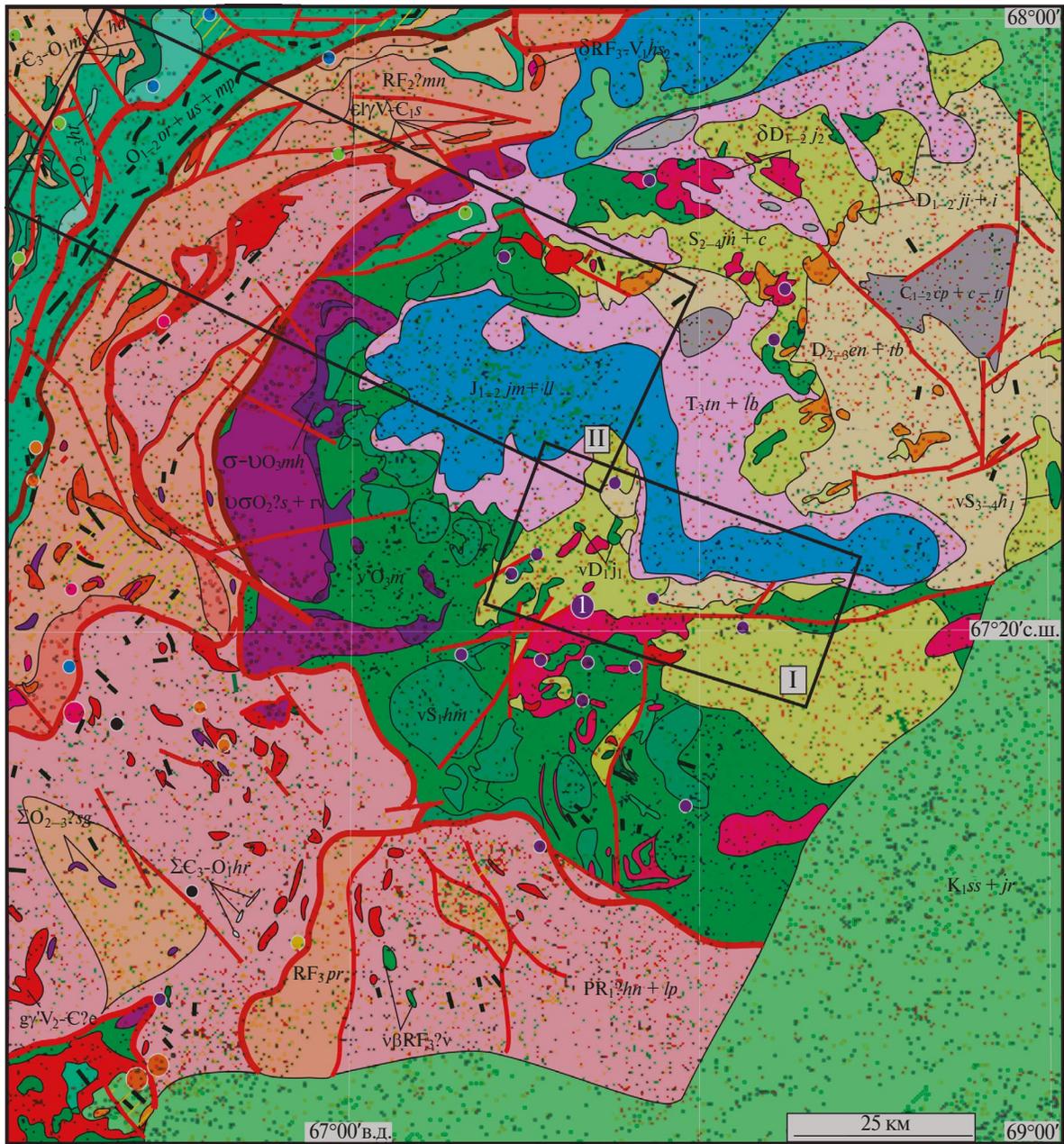


Рис. 10. Схема развития гидротермально-метасоматических пород для изучаемой территории, полученная по материалам КС КА Д33 HLS-2 и вынесенная на упрощенную геологическую карту, по (Зылева и др., 2014): 1–38 – соответствуют рис. 2; 39–42 – вторичные изменения соответствуют рис. 8; 43 – границы площадей, выделенных по материалам КС КА Д33 HLS-2 (номера I–II на карте – см. пояснения в тексте).

2. Зоны распространения гидротермальных изменений, выделенных на основе обработки КС КА ДДЗ.

3. Области с высокими концентрациями линейментов, т.е. сильно нарушенными горными породами.

4. Локализация рудных объектов: выделено 2 перспективных участка, которые на схемах дешифрирования КС отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов распределения оксидов трехвалентного железа (гематит) и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), а также гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов.

В пределах выделенного на основе анализа КС перспективного участка № I развиты породы сьумкеуского, малохадатинского, харампэйско-масловского и евьюганского комплексов, а также теунтойской, лаборовской, ханмейхойской, минисейшорской и объединенных яны-маньинской и тольинской свит (рис. 10).

В эту площадь входят объекты Fe-рудной минерализации, включая месторождение Юньягинское.

Перспективный участок № II состоит из пород малыкского и юньягинского (первая и вторая фазы) комплексов, объединенных янганапэйской и карбонатной, яны-маньинской и тольинской свит.

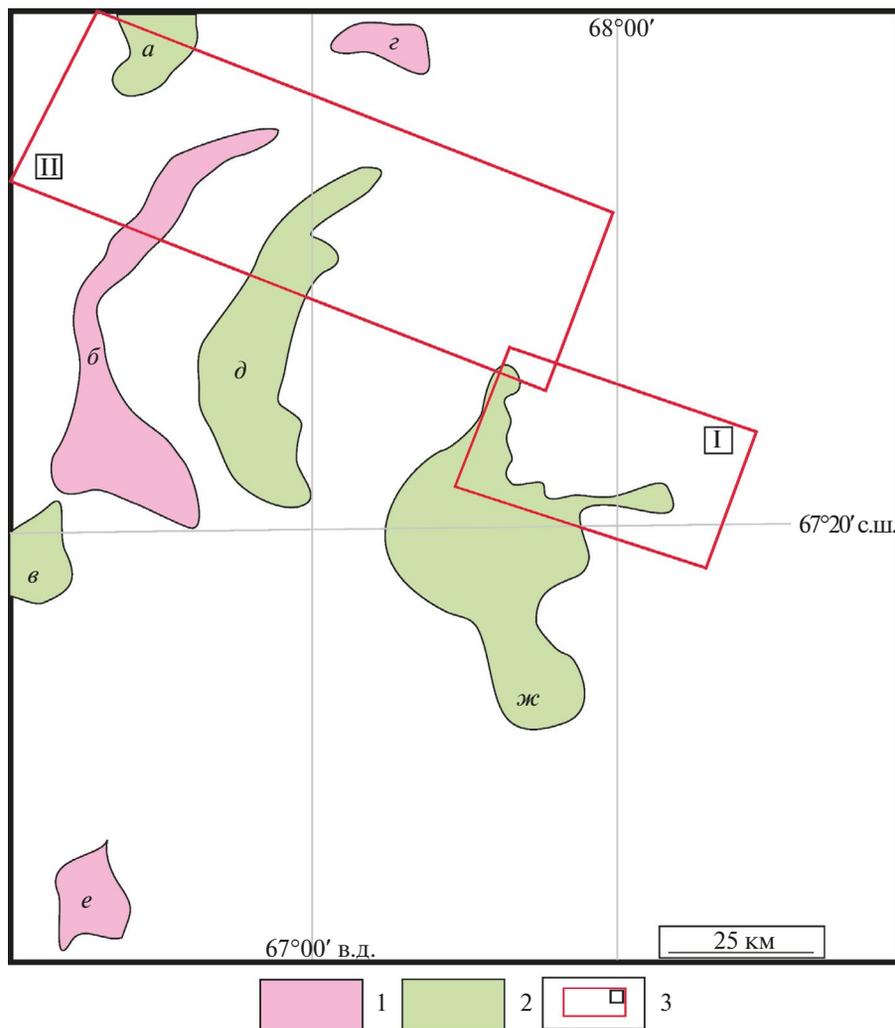


Рис. 11. Схема прогноза ПИ и продуктивности рудных районов и узлов для листа Q-42 по (Литвинов, Кудрявцев, 2011) упрощенная: 1 – высокая продуктивность, установлено (или прогнозируется) крупное месторождение профилирующего для узла (или района) комплекса ПИ, 2 – средняя – установлено (или прогнозируется) среднее месторождение профилирующего для узла (или района), 3 – границы площадей, выделенных по материалам КС КА ДЗЗ HLS-2. Буквами показаны вид сырья и категория ресурсов: а – Pb (P_3 – 125 тыс. т), Zn (P_3 – 12.5 тыс. т), Cu (P_3 – 32,5 тыс. т), б – Au (P_3 – 20 т), в – Cr (P_3 – 5.5 млн. т), г – Au (P_3 – 22 т), д – Cr (P_3 – 10 млн. т), е – Au (P_3 – 25 т, P_2 – 78 т, P_1 – 38.5 т), Fe (P_3 – 23.6 тыс. т, P_2 – 70 тыс. т, P_1 – 18 тыс. т), ж – Fe (P_3 – 140 тыс. т), Au (P_3 – 60 т).

К данной территории принадлежат Mo, Cu, Pb-Zn и Fe-рудные проявления.

Кроме того, о достоверности данной методики говорит и то, что выделенные при помощи КС перспективные площади входят в области с высокой и средней продуктивностью на схеме прогноза ПИ и продуктивности рудных районов и узлов, составленной Институтом Карпинского (Зылева и др., 2014) (рис. 11) для изучаемой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате 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 и выявлена 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.

Выявлены закономерности и на их основании сформулированы прогнозно-поисковые критерии на золоторудный тип минерализации в пределах ЩЗ Полярного Урала:

Структурный критерий №1. Площади, перспективные на золоторудный тип минерализации, следует искать вдоль трансрегиональных разломных зон, которые пересекают благоприятные горизонты и структуры и контролируют рудную минерализацию, а также по периферии крупной (97 на 76 км) чашеобразной гетерогенной вулканоплутонической структуры 1-го порядка с длительной историей развития, локализованной над внутрикоровыми магматическими камерами.

Структурный критерий №2. Морфоструктура должна быть осложнена кольцевыми и дуговыми структурами 2-го и более высокого ранга, а также разрывными нарушениями СЗ и СВ простирания протяженностью более 10 км, либо ослабленными зонами, вдоль которых фиксируются внедрения интрузивных тел, парагенетически связанных с минерализацией.

Вещественный критерий. В потенциально рудоносных вулканических постройках должны быть проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксидов трехвалентного железа (гематит) и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов и оксидов двухвалентного железа.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С.* Золото-концентрирующие системы Южно-го 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.
- Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др.* Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. М.: Наука, 1985. 200 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) // Современ. пробл. дистан. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 - Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Душин В.А.* Геологическое строение и магматизм Щучинского мегаблока (Полярный Урал) // Известия УГГУ. 2020. Вып. 4(60). С. 35-56.
- Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В.* Геологическая позиция и структурный контроль золоторудной минерализации Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2020. №4. С. 51–62.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И.* Структурный контроль золоторудной минерализации восточного склона Полярного Урала по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2021. №6. С. 60–73.
- Иванова Ю.Н., Нафигин И.О.* Применение набора данных Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM для прогнозирования золото-полиметаллической минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны, Полярный Урал // Исследования Земли из космоса. 2023 № 6. С. 20–34.

- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Черемных А.В.* Некоторые возможности линеamentного анализа при картировании разноранговых разломов (на примере Прибайкалья) // Исследование Земли из космоса. 2022. №3. С.66–83.
- Калмыков Б.А., Трусов А.А.* Особенности внутреннего строения палеозойских комплексов Щучинского синклиория Полярного Урала по аэрогеофизическим данным // Разведка и охрана недр. 2015. С. 57–64.
- Коротков В.В.* Геохимические и другие технологии, методы и методики при прогнозировании и поисках месторождений (преимущественно “скрытого” типа) // ФГБУ “ВИМС”, 2023. 166 с.
- Космическая информация в геологии / Под ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Красинский Е.М., Кудряшов И.В.* Схема предварительной комплексной интерпретации геофизических материалов. Масштаб 1:1000000, лист Q 42. ФГУП “ВСЕГЕИ”, 2011.
- Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С.* Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпitherмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 333. № 10. С. 17–34.
- Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю.* Структурные, геофизические и геохимические критерии эпitherмального кислотного-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 60–72.
- Литвинов Т.П., Кудрявцев И.В.* Схема предварительной комплексной интерпретации геофизических материалов (актуализированная). Масштаб 1:1000000. Лист Q-42 (Салехард). М.: ФГУП “ВСЕГЕИ”, 2011.
- Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т., Апарина А.Д.* Применение космической съемки высокого разрешения при поисках прибрежных россыпей и месторождений углеводородов в северных морях России // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 74–82. 2021.
- Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.* Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17. № 7. С. 117–127.
- Пучков В.Н., Иванов К.С.* Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектон. 2020. № 1. С. 41–61.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 (2-е изд., циф.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объяс. зап. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Селюкова Т.Н., Галиуллин И.З., Ивановская Г.П. и др.* Отчет о поисковых работах на золото вдоль трассы Обская-Бованенково. Отчет Харбейского отряда за 1996-1999 г.г., п. Полярный, Полярно-Уральское государственное геологическое предприятие, 1999.
- Серокуров, Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В.* Дистанционная оценка золотоносного потенциала // Руды и металлы. 2008. № 1. С. 45–51.
- Томпсон И.Н., Кочнева Н.Т., Кравцов В.С. и др.* Металлогения скрытых линеamentов и концентрических структур. М.: Недра, 1984. 272 с.
- Уэйджер Л., Браун Г.* Расслоенные изверженные породы // под ред. В.П. Петрова, пер. с англ. М.: Мир, 1970. 552 с.
- Шарков Е.В.* Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М.: Научный мир, 2006. 368 с.
- Шарпенюк Л.Н.* Магматогенно-рудные системы континентальных вулcano-плутонических поясов подвижных областей // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 84–90.
- Шарпенюк Л.Н.* Магматогенные кольцевые структуры. Недра, Ленинград, 1979, 231 с.
- Яковлев Г.Ф.* Геологические структуры рудных полей и месторождений. М.: Из-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.
- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A.* Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // Doklady Earth Sciences. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmanna U.M., Koller V.F.* ESA and the Arctic - The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. Jour.of Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
- Claveriea 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.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F.* Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // Economic Geology. 1994. V. 89. – P. 1906–1923.
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180-190, 235-240, and 332-336.
- 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.
- Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57 P. 1163–1169.

- Masek J.G., Claverie J., Ju. M. et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- 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.
- Masoud A.A., Koike K. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // Tectonophysics. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Mather P.M. Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
- Maurer T. How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method—a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp. 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101.
- 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.
- Verdiansyah O. A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // Indonesian Journ. of Geography. 2019. 51, 1. P. 31–41.
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // Jour. Teknologi Technoscienti, 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).
- Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- 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 Gold Mineralization Type Using the Data Set of Remote Sensing Satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the Territory of the Northern End of the Eastern Slope of the Polar Urals

J. N. Ivanova^{1,2}

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

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

For the first time, an approach was applied to the processing of Earth remote sensing data for the territory of the northern end of the eastern slope of the Polar Urals. An approach is based 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 and the digital elevation model Aster GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). The work was carried out with the aim of identifying morphological features and patterns, features of the deep structure and identifying areas promising for the gold type of mineralization in the study area. As a result of the study, two new perspective areas were delineated and new predictive and prospecting features of gold mineralization were identified within the study area: (1) areas promising for the gold ore type of mineralization should be sought along transregional fault zones that intersect favorable horizons and structures and control ore mineralization, and along the periphery of a large (97 by 76 km) bowl-shaped heterogenic-plutonic structure of the 1st order of complex structure and long-term development, developed above intracrustal magma chambers; (2) morphostructure should be complicated by ring and arc structures of the 2nd and lower order, as well as discontinuous faults of NW and NE directions with a length of more than 10 km, or weakened zones along which the introduction of intrusive bodies is recorded, genetically related to mineralization; (3) potentially ore-bearing volcanic structures should exhibit metasomatic halos of a significant area (more than 30 km²) with increased indices of ferric iron oxides (hematite) and iron oxides and hydroxides (limonite) and, to a lesser extent, hydroxyl-(Al-OH, Mg -OH), carbonate-containing minerals and oxides and oxides of ferrous iron.

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.
- 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).
- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A.* Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // *Doklady Earth Sciences*. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmann U.M., Koller V.F.* ESA and the Arctic - The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. Jour. of Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401. 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.
- Dushin V.A.* Geological structure and magmatism of the Shchuchinsky megablock (Polar Urals) // *News of the USGU*. 2020. Issue. 4(60). P. 35–56. (in Russian).
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., and et al.* The shuttle radar topography mission // *the American Geophysical Union*. 2007. P. 1–33.
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., et al.* Osobennosti mineralogicheskoy zonal'nosti rudno-magmatischekikh sistem, vmeshchayushchikh kvartsevo-zhil'nyye mestorozhdeniya zolota (po materialam sputnikovoy spektrometrii) // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2014. T. 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 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. 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 (the Polar Urals) based on the analysis of multispectral images of the Landsat 8 spacecraft // *Earth Research from Space*. 2020. No. 4. P. 51–62. (in Russian).
- Ivanova J.N., Nafigin I.O.* Application of the Landsat-8 data set and the SRTM digital elevation model to predict gold-base metal mineralization in the central part of the Little Ural zone, Polar Urals // *Earth Research from Space*. 2023. №6. P. 20–34. (in Russian).
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V.* Some possibilities of lineament analysis when mapping faults of different ranks (using the example of the Baikal region) // *Earth Research from Space*. 2022. No. 3. P.66–83. (in Russian).
- 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.
- Kalmykov B.A., Trusov A.A.* Features of the internal structure of the Paleozoic complexes of the Shchuchinsky synclinorium of the Polar Urals according to airborne geophysical data // *Exploration and protection of subsurface resources*. 2015. P. 57–64. (in Russian).
- Korotkov V.V.* Geochemical and other technologies, methods and techniques for forecasting and searching for deposits (mainly “hidden” type) // *Federal State Budgetary Institution “VIMS”*, 2023. 166 p. (in Russian).
- Krasinsky E.M., Kudryashov I.V.* Scheme of preliminary comprehensive interpretation of geophysical materials. Scale 1:1000000, sheet Q 42. FSUE “VSEGEI”, 2011. (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.
- Litvinov T.P., Kudryavtsev I.V.* Scheme of preliminary comprehensive interpretation of herphysical materials (updated). Scale 1:1000000. Sheet Q-42 (Salekhard). M.: FSUE “VSEGEI”, 2011.
- Loughlin W.P.* *Principal Component Analysis for Alteration Mapping* // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M. et al.* *Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0*. 2018.
- 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.
- 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.
- Milovsky G.A., Ishmukhametova V.T., Aparina A.D.* Application of high-resolution satellite imagery in the search for coastal placers and hydrocarbon deposits in the northern seas of Russia // Earth Research from Space. 2021. No. 6. P. 74–82. 2021. (in Russian).
- Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A. L., Chistova Z.B.* Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2020. 17(7). P. 117–127. (In Russian).
- Puchkov V.N., Ivanov K.S.* Tectonics of the northern Urals and Western Siberia: general history of development // Geotecto. 2020. No. 1. P. 41–61. (in Russian).
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. St. 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.
- Selyukova T.N., Galiullin I.Z., Ivanovskaya G.P. et al.* Report on prospecting for gold along the Obskaya-Bovanenkovo highway. Report of the Kharbey team for 1996–1999, Polyarny village, Polar-Ural State Geological Enterprise, 1999. (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).
- Sharkov E.V.* Formation of layered intrusions and associated mineralization. M.: Scientific world, 2006, 368 p. (in Russian).
- Sharpenok L.N.* Magmatogenic ring structures. Nedra, Leningrad, 1979, 231 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).
- Space information in geology / Ed. A.V. Peive. M.: Nauka, 1983. 536 p. (in Russian).
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (3rd generation). Ural series. Sheet Q-41 – Vorkuta. Explain. zap. St. Petersburg: VSEGEI, 2007. 541 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., Seliv-erstov V.A.* Metallogeny of hidden lineaments and concentric structures. M.: Nedra, 1984. 272 p. (in Russian).
- Vaganov V.I., Ivankin P.F., Kropotkin P.N.* Explosive ring structures of shields and platforms. M.: Nauka, 1985. 200 p. (in Russian).
- Vidyapin Yu.P., Bondar I.V.* Possibilities of using lineament analysis of the earth's surface topography for geodynamic studies on the example of the Caucasus region // Bulletin of the Moscow Society of Natural Scientists. Geological department. 2021. V.96. No. 21. P. 39–52. (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. 51, 1. P. 31–41.
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // Jour. Teknologi Technosci, 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).
- Wager L., Brown G.* Layered igneous rocks // ed. V.P. Petrova, M.: Mir, 1970. 552 p. (in Russian).
- 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. 1982, M.: Moscow University, 270 p.
- 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.
- Zylyova L.I., Kononov A.L., 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).