



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 528.87

DOI: 10.19110/geov.2025.11.3

### Возможности литологического картирования на территории северного окончания восточного склона Полярного Урала с использованием данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2

Ю. Н. Иванова<sup>1,2</sup>

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

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

*jnivanova@yandex.ru*

Для Щучьинской зоны Полярного Урала впервые выполнено литологическое картирование методом космодешифрирования на основании цифровых данных прибора дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2.

Целью исследования является оценка возможностей и эффективности использования данных космического аппарата Harmonized Landsat Sentinel-2 с применением современных методов обработки изображений для литологического картирования на территории северо-восточного склона Полярного Урала (Щучьинская зона с Au-Fe-месторождением Юньягинское).

Построена литологическая карта территории исследования, демонстрирующая хорошую корреляцию с существующей геологической картой региона. В частности, метаморфизованные породы уверенно идентифицируются по цветовой гамме от темно-синего до фиолетового, ультраосновные – по красному, а сочетание зеленого и синего цвета указывает на области распространения осадочных и метаморфических пород.

Результаты исследования подтверждают результативность выбранного подхода и демонстрируют значительный потенциал использования космических снимков для геологического картирования территорий с высокогорным рельефом и небольшим покровом четвертичных отложений (до 6 м). Для дальнейшего повышения точности и расширения области применения методики рекомендуется интеграция с другими методами обработки космических изображений, позволяющими эффективно выделять литологические единицы в условиях мощного слоя четвертичных отложений, а также верификация полученных результатов посредством полевых работ.

**Ключевые слова:** космические снимки, Полярный Урал, Harmonized Landsat Sentinel-2, литологическое картирование, минимальная доля шума, цветовой композит

### Potential for lithological mapping at the northern end of the eastern slope of the Polar Urals using data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing satellite

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

<sup>1</sup> Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

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

For the first time, lithological mapping has been carried out for the Shchuchinsky zone of the Polar Urals using the space decoding method on the basis of digital data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing instrument. The objective of this study is to evaluate the feasibility and effectiveness of Harmonized Landsat Sentinel-2 satellite data with modern image processing methods for lithological mapping of the northeastern slope of the Polar Urals (the Shchuchinsk zone hosting the Yunyaginskoye Au-Fe deposit).

We have created a lithological map of the study area showing a strong correlation with the existing geological map of the region. Specifically, metamorphosed rocks are reliably identified by dark blue to violet hues, ultramafic rocks by red, and a combination of green and blue indicates areas of sedimentary and metamorphic rocks.

**Для цитирования:** Иванова Ю. Н. Возможности литологического картирования на территории северного окончания восточного склона Полярного Урала с использованием данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2 // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 26–32. DOI: 10.19110/geov.2025.11.3

**For citation:** Ivanova J. N. Potential for lithological mapping at the northern end of the eastern slope of the Polar Urals using data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing satellite. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 26–32, doi: 10.19110/geov.2025.11.3



The study results confirm the effectiveness of the chosen approach and demonstrate a significant potential of using this satellite imagery for geological mapping in high-mountain terrain with a thin cover of Quaternary sediments (up to 6 m). To further improve the accuracy and expand the method applicability, integration with other satellite image processing techniques that effectively identify lithological units under thicker Quaternary cover is recommended together with fieldwork verification.

**Keywords:** satellite imagery, the Polar Urals, Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS), lithological mapping, minimal noise, color composite

## Введение

Литологическое картирование с применением современных космических снимков (КС) аппаратов дистанционного зондирования Земли, особенно в таком труднодоступном регионе, как Полярный Урал, открывает новые горизонты для изучения его геологического строения. Благодаря высокой разрешающей способности и широкому спектральному диапазону космических данных возможно детальное выделение и идентификация различных типов горных пород. Это позволяет значительно повысить точность геологических карт и прогнозировать распределение полезных ископаемых, что критически важно для устойчивого развития горнодобывающей промышленности в Арктике.

В этой работе использованы спутниковые данные космического аппарата (КА) Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2) с пространственным разрешением 30 м. Данные HLS-2 доступны бесплатно на сайте [www.search.earthdata.nasa.gov](http://www.search.earthdata.nasa.gov). Более подробную информацию о характеристиках данного КА можно найти в работе (Maseki et al., 2018).

Целью данного исследования является оценка возможностей и эффективности использования данных КА HLS-2 с применением современных методов обработки изображений для литологического картирования на территории северо-восточного склона Полярного Урала (Щучьинская зона с Au-Fe-месторождением Юньягинское).

Результаты данного исследования могут быть использованы для обновления и уточнения существующих геологических карт, планирования геолого-разведочных работ в труднодоступных районах и адаптации решения задач геологического картирования на других северных территориях.

## Геологическое строение Щучьинской зоны

Щучьинская зона (ЩЗ) расположена на крайнем севере Уральской складчатой области, в ее восточной, крайне пологой части. Ключевым элементом этой структуры является Главный Уральский разлом, иначе именуемый Главной Уральской сутурой; на большей части он проявлен в виде надвига, здесь он в основном погребен под чехлом рыхлых отложений (MZ-KZ) (рис. 1).

В структуре рассматриваемого региона четко выделяются несколько секторов. Здесь фундамент сложен палеозойскими складчатými структурами, образованными породами ордовикского, силурийского, девонского и каменноугольного периодов. Этот фундамент перекрыт платформенными мезозойскими отложениями, относящимися к юрскому и триасовому периодам (Душин, 2020). Среди магматических по-

род преобладают габброиды, в то время как гранитоиды встречаются гораздо реже и формируют небольшие штокообразные массивы.

Различные свиты и комплексы пород содержат разнообразную рудную минерализацию. Наиболее значимой является рудная нагрузка гипабиссальных-абиссальных метагаббро-долеритового васьюкеуского и габбро-норитового харампэйско-масловского комплексов; они несут Fe-Ti-V-ортомагматическое и Fe- ( $\pm$  Cu, Au)-скарновое оруденение. Магнетитовая эпискарновая минерализация ( $\pm$  Cu) развита также во вмещающих эти плутоны породах янганапэйской толщи, представленной чередованием основных-средних вулканитов и терригенно-карбонатных пород. Метатерригенные (отчасти углеродистые и карбонатные) породы малопайпудынской и хантейской свит несут стратоидные скопления  $\text{Cu}^{\pm}\text{Au}$ - и полиметаллической минерализации.

Плутонические образования харбей-собского комплекса содержат Mo-, Pb-Zn-, Cu-кварцевые и Fe-скарновые рудопроявления. Кислые интрузивы сядатаяхинского и евьюганского комплексов, а также их приконтактные зоны включают Au-, Mo- и Cu-рудопроявления. Метатерригенные ( $\pm$  известняки) породы хойдышорской и усинской свит несут стратоидную  $\text{Cu}^{\pm}\text{Au}$ -минерализацию; в метатерригенных (отчасти углеродистых и карбонатных) породах орангской свиты, переслаивающихся с редкими потоками базальтов, выявлена Pb-Zn-минерализация.

В ультрабазитах сгум-кеуского комплекса, а также дайкоподобных телах хартманюшорского комплекса отмечены крупные скопления хромитов. Метаморфогенные Ti-рудопроявления выявлены в метаморфизованных в высокобарных условиях образования ( $\approx$  эклогиты) слюдяногорского комплекса.

Главным потенциально промышленным рудным объектом является Fe-скарновое ( $\pm$  Cu, Au) Юньягинское месторождение; через его рудное поле проходит железнодорожная линия Обская – Бованенково. Оно пространственно и генетически связано со 2-й фазой юньягинского многофазного (габбро + гранодиориты + граниты) комплекса; с ней же ассоциируют мелкие скарно-магнетитовые рудопроявления. Здесь в одном и том же рудном районе соседствуют рудные залежи Fe( $\pm$ Cu, Au)-скарновых руд, базитовых Ti-Fe-руд волковского типа, ультрабазит-базитовых Fe-Ti-V-руд качанарского типа. Все эти проявления нуждаются в более детальном геологическом исследовании и оценке их экономического потенциала (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

Геологическое строение и металлогения Щучьинской зоны, хотя и детально описаны в отдельных монографиях, статьях (Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014; Душин, 2020; Пучков, Иванов, 2020) и ряде производственных отчетов, требуют доизучения.

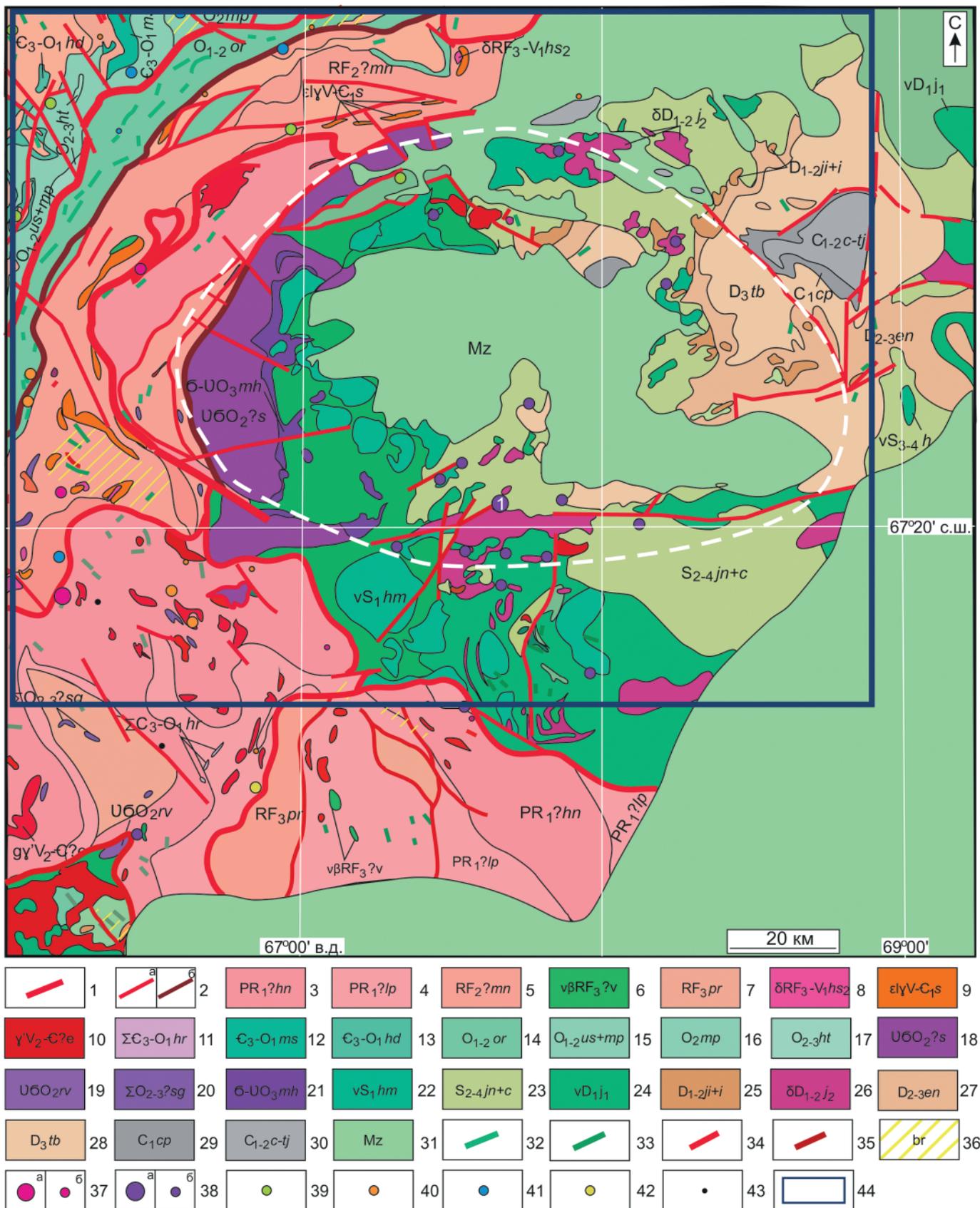


Рис. 1. Схема геологического строения Щучинской зоны по данным госгеолкарты масштаба 1:1000000 (Зылева и др., 2014):

1–2 — разломы: 1 — шарьяж, 2 — надвиг и взбросонадвиг (а), в т. ч. с предполагаемым рудоконтролем (б), 3–31 — свиты, толщи и комплексы: 3 — ханмейхойская свита: альбитовые амфиболиты с гранатами, реже амфибол-сланцевые и слюдяные гнейсы, линзы мраморов, железистые кварциты и гондиты; 4 — лаптаюганская свита с амфибол-биотитовыми и амфиболовыми прогнейсами, амфиболитами; 5 — метабазальтовая и метатерригенная минисейшорская свита; 6 — метагаббро-долеритовый васькеуский комплекс, несущий Fe-Ti-V-минерализацию; 7 — париквасьшорская свита с гранат-слюдисто-альбит-кварцевыми кристаллосланцами и сланцами, слюдяными плаггиогнейсами, в низах — амфиболиты, амфиболитовые гнейсы, кварциты и гондиты, в верхах — высокоглиноземистые кристаллосланцы; 8 — вторая фаза габ-



бродиорит-гранодиоритового харбей-собского комплекса, несет скарново-магнетитовую, Cu-Mo-, Pb-Zn-минерализацию, 9 — гранодиоритовый сыдатыахинский комплекс, несущий Mo±Au-оруденение, 10 — метагранитовый евьюганский комплекс с метагранитами, метааласкитами, реже металагиогранитами, штоками гнейсогранитов и пластовыми телами гнейсогранитов с As-, Au-, Mo- и Cu-минерализацией; 11 — ультрамафитовый хартманюшорский комплекс, в него входят малые тела и дайки серпентинитов с Cr-минерализацией; 12 — метатерригенная минисейская свита; 13 — метатерригенная хойдышорская свита, несущая стратоидную Cu±Au-минерализацию; 14 — метатерригенная (отчасти углеродистая и карбонатная) с подчиненными базальтами орангская свита, несущая Pb-Zn-минерализацию; 15 — метатерригенные (± известняки) усинская и малопайпудынская свиты, несущие Cu±Au-минерализацию; 16 — метатерригенная (± известняки) малопайпудынская свита; 17 — метатерригенная (отчасти углеродистая и карбонатная) хантейская свита (в 16 и 17 — стратоидные скопления Pb-Zn-сульфидов); 18 — дунит-лерцолит-гарцбургитовый сyum-кеуский комплекс с промышленными скоплениями хромитов; 19 — дунит-лерцолит-гарцбургитовый райизско-войкарский комплекс; 20 — метальтрамафиты (отчасти эклогитоподобные) слюдяногорского комплекса, несут метаморфогенную Ti-минерализацию; 21 — дунит-верлит-клинопироксенитовый малохадатинский комплекс; 22 — метагаббровый малькский комплекс; 23 — габброноритовый харампэйско-масловский комплекс, несет Fe-Ti-V- и Cu-Fe-скарновое оруденение; 24 — первая фаза габбро-гранодиорит-гранитного юньягинского комплекса, в габбро — Fe-Ti-V-оруденение, 25 — объединенные янганапэйская и карбонатная толщи с базальтами, андезибазальтами, дацитами, плагиориолитами и их туфами, прослоями терригенных и карбонатных пород, несут Fe-скарновую и Cu-минерализацию, местами — горизонты бокситов; 26 — вторая фаза габбро-гранодиорит-гранитового юньягинского комплекса с Cu-Fe-скарновым оруденением, 27 — терригенная (± известняки) ензорская толща; 28 — терригенная (± трахибазальты, пепловые туффиты) тальбейская толща; 29 — карбонатно-терригенная толща; 30 — терригенно-карбонатная, терригенная толща; 31 — терригенные породы MZ (± бурые угли); 32–35 — внемасштабные тела даек основного (32, 33) и кислого (34, 35) состава с Mo-, Au-, As-, Cu-минерализацией; 36 — зона березитизации; 37–43 — месторождения (а), рудопроявления и пункты минерализации (б): 37 — Mo, 38 — Fe, 39 — Au, Au-Fe, 40 — Cu, 41 — Pb-Zn, 42 — As-Mo-Au, 43 — Ti; 44 — границы изучаемой территории. Цифрой 1 обозначено Юньягинское месторождение, белой пунктирной линией — границы Щучьинского палеовулкана

**Fig. 1.** Geological map of the Shchuchinskaya zone after the State Geological Map at a scale of 1:1000000 (Zyleva et al., 2014):

1–2 — faults: 1 — nappe, 2 — thrust and reverse-thrust fault (a), including those with supposed ore control (b); 3–31 — suites, strata and complexes: 3 — Khanmeikhoy suite: albite amphibolites with garnets, less common amphibole-mica and mica gneisses, ferruginous quartzites and gondites; 4 — Laptayugan suite: amphibole-biotite and amphibole gneisses, amphibolites; 5 — Miniseishor suite: metabasalt and metaterrigenous rocks; 6 — Vaskeu metagabbro-dolerite complex, bearing Fe-Ti-V mineralization; 7 — Parikvashor suite: garnet-mica-albite-quartz crystalline schists and schists, mica plagiogneisses; in the lower parts — amphibolites, amphibolite gneisses, quartzites and gondites; in the upper parts — high-alumina crystalline schists; 8 — the second phase of the Harbey-Sob gabbro-diorite-granodiorite complex, hosting skarn-magnetite, Cu-Mo, and Pb-Zn mineralization; 9 — Syadatyakh granodiorite complex, hosting Mo±Au mineralization; 10 — Ev'yugan metagranite complex with metagranites, meta-alaskites, less often meta-plagiogranites, gneissogranite stocks and sheeted bodies of gneissogranites with As, Au, Mo, and Cu mineralization; 11 — ultramafic Khartmanushor complex, including small bodies and dikes of serpentinites with Cr mineralization; 12 — metaterrigenous Minisei suite; 13 — metaterrigenous Khoiydyshor suite, bearing stratoid Cu±Au mineralization; 14 — metaterrigenous (partly carbonaceous and carbonate) orangsky suite with subordinate basalts, bearing Pb-Zn mineralization; 15 — metaterrigenous (±limestones) Usinsk and Malopaipudyn suites, bearing Cu±Au mineralization; 16 — metaterrigenous (±limestones) Malopaipudyn suite; 17 — metaterrigenous (partly carbonaceous and carbonate) Khantey suite (in suites 16 and 17 — stratoid accumulations of Pb-Zn sulfides); 18 — dunite-lherzolite-harzburgite Syum-Keu complex with industrial accumulations of chromites; 19 — dunite-lherzolite-harzburgite Raizko-Voikar complex; 20 — metaultramafites (partly eclogite-like) of the Slyudyanogora complex, carrying metamorphogenic Ti mineralization; 21 — dunite-wehrlite-clinopyroxenite Malokhadata complex; 22 — metagabbro Malyk complex; 23 — gabbronorite Kharampei-Maslov complex, containing Fe-Ti-V and Cu-Fe-sкарн mineralization; 24 — first phase of the gabbro-granodiorite-granite Yunyakha complex, with Fe-Ti-V mineralization in gabbro; 25 — combined Yanganapey and carbonate strata with basalts, andesibasalts, dacites, plagioryholites and their tuffs, interlayers of terrigenous and carbonate rocks, bearing Fe-sкарн and Cu mineralization, and in places - horizons of bauxites; 26 — second phase of the gabbro-granodiorite-granite Yunyakha complex with Cu-Fe-sкарн mineralization; 27 — terrigenous (±limestones) Enzor strata; 28 — terrigenous (±trachybasalts, ash tuffites) Talbey strata; 29 — carbonate-terrigenous strata; 30 — terrigenous-carbonate, terrigenous strata; 31 — terrigenous MZ rocks (±brown coals); 32–35 — off-scale bodies of dikes of basic (32, 33) and acidic (34, 35) composition with Mo, Au, As, Cu mineralization; 36 — beresitization zone; 37–43 — deposits (a), ore occurrences and mineralization points (b): 37 — Mo, 38 — Fe, 39 — Au, Au-Fe, 40 — Cu, 41 — Pb-Zn, 42 — As-Mo-Au, 43 — Ti; 44 — boundaries of the studied territory. The number 1 indicates the Yunyaga deposit, the white dotted line indicates the boundaries of the Shchuchin paleovolcano

### Исходные данные и подходы

Выбраны дневные и безоблачные снимки аппарата HLS-2 для территории изучения:

- HLS.S30.T41WPQ.2022212T071619;
- HLS.S30.T42WVW.2022212T071619;
- HLS.S30.T41WPR.2022212T071619;
- HLS.S30.T42WVA.2022212T071619.

Изображения можно получить с сайта <https://search.earthdata.nasa.gov>.

Версия HLS-2 включает предобработку KC.

Алгоритм методики, принятый в данном исследовании, состоит из следующих этапов:

- применение преобразования минимальной доли шума (Minimum Noise Fraction —MNF) и подготовка цветового композита MNF, наиболее подходящего для выделения литологических изменений для KC;
- литологическое картирование в среде ГИС путем визуальной интерпретации цветового композита, подготовленного на основе комбинаций индексов минералов и каналов MNF и экранной оцифровки;

— верификация полученной литологической карты путем сравнения с имеющимися геологическими данными и полевыми исследованиями;

— оценка и анализ точности и надежности полученной литологической карты;

— определение перспектив использования космической съемки для геологического картирования в аналогичных регионах.

Преобразование MNF и подготовка цветового композита выполнены в программе ENVI. Систематизация и обобщение данных — в QGIS.

## Методы исследования

*1. Преобразование минимальной доли шума (MNF).* Это метод обработки мультиспектральных и гиперспектральных изображений, который упорядочивает компоненты в порядке убывания отношения «сигнал/шум» (SNR). Цель — выделить информативные признаки и уменьшить шум в данных. Метод предложен в 1988 году Грином, Берманом, Свитцером и Крейгом (Green et al., 1988). Первый этап MNF заключается в использовании ковариационной матрицы шума для декорреляции и нормализации шумовых компонент. Данные, характеризующиеся единичной дисперсией и отсутствием корреляции между каналами, идентифицируются как шум и отделяются от исходного набора данных. Этот процесс позволяет минимизировать влияние шума на последующие этапы обработки. На втором этапе к данным, очищенным от шума, применяется стандартная PCA-трансформация. Целью этой трансформации является переупорядочение среднеквадратических отклонений шумовых компонент. Полученные MNF-изображения, как и изображения главных компонент, упорядочиваются в соответствии с максимальной изменчивостью данных.

*2. Цветовой композит.* По данным (Lakshmi, Kusuma, 2018), с целью литологического картирования разрабатан и использован цветовой композит в ложных цветах MNF (RGB: 5-2-3) для спектральных каналов КА Landsat-8. Для КА HLS-2 цветовой композит будет RGB: 8a-2-3 (по: Masek et al., 2018; Sekandari et al., 2020).

## Результаты и обсуждение

В работах (Иванова и др., 2019; Иванова, Выхристенко, 2021) для ШЗ выделена крупная кольцевая морфоструктура овальной формы 1-го порядка (размером 97 на 76 км) — Щучьинский палеовулкан. Описано ее геологическое строение, на основе дистанционных данных (Landsat 8) и высокоточной цифровой модели рельефа (ASTER GDEM) выполнен анализ линеаментной сети и подготовлена карта дешифрованных морфоструктур, в том числе рудоперспективных.

На исследуемой территории, по данным (Зылева и др., 2014), выделяются зоны развития березитоподобных метасоматитов, с которыми генетически связаны проявления молибденовой, золоторудной, железозолоторудной и полиметаллической минерализации. Однако обнаружение этих зон с использованием методов дистанционного зондирования затруднено. Причиной тому является значительная мощность четвертичных отложений, достигающая 450 м. На отдельных локальных участках, где мощность четвертичных

отложений сокращается до 6 м (Викентьев и др., 2021), наблюдается совпадение их литологии с данными дешифрирования снимков.

Таким образом, для повышения эффективности поисковых работ и картирования потенциально рудоносных зон необходимо учитывать влияние четвертичного чехла. Одним из направлений может быть применение геофизических методов, позволяющих проникать на большую глубину и получать информацию о строении коренных пород. Кроме того, перспективным является анализ данных дистанционного зондирования в комплексе с геохимическими данными, полученными при опробовании четвертичных отложений, с целью выявления индикаторных элементов, связанных с коренной минерализацией. Цветовой композит, полученный с помощью КА HLS-2 MNF (RGB:8a-2-3), оказался эффективным для распознавания некоторых литологических единиц в исследуемой области (рис. 2, а).

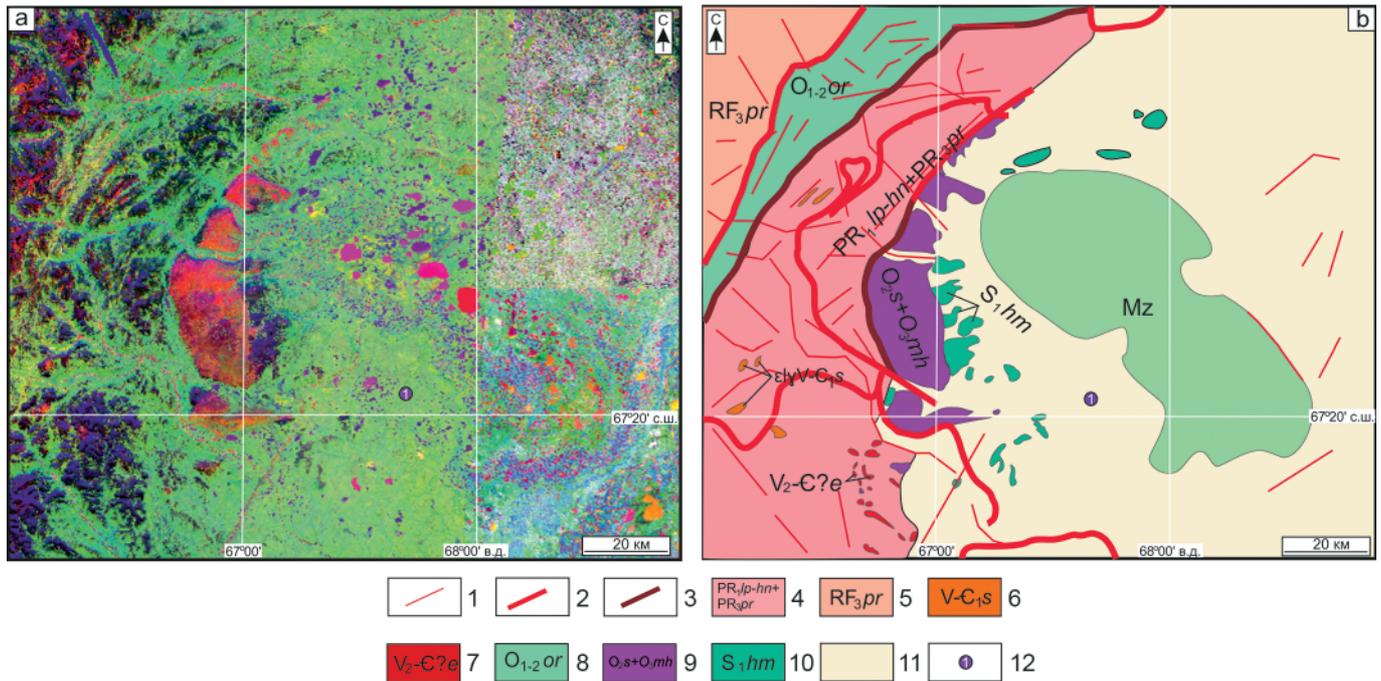
Красный цвет соответствует магматическим ультраосновным (УО) породам: дунит-гарцбургитовому сьум-кеускому и дунит-верлит-клинопироксенитовому малохадатинскому комплексам (рис. 2, b). Цвета от темно-синего до фиолетового соответствуют метаморфическим породам, образовавшимся при региональном и контактовом метаморфизме умеренной и высокой ступеней: ханмейхойской, лаптаюганской, париквасьшорской свитам и малыкскому комплексу.

Схожий состав метаморфических пород и сложное геологическое строение создают трудности для разделения ханмейхойской, лаптаюганской и париквасьшорской свит, а также выделения пород евьюганского комплекса. Например, гнейсы, представленные зеленым цветом, не демонстрируют изменений оттенков, что может объясняться примерно одинаковым содержанием в них  $\text{SiO}_2$  (Lakshmi, Kusuma, 2018). В гнейсах париквасьшорской свиты концентрации  $\text{SiO}_2$  составляют около 76 % (Шишкин и др., 2008), тогда как в аналогичных породах ханмейхойской свиты — 62–70 % (Уляшева, 2013).

Сочетание зеленого и синего цвета соответствует осадочным и метаморфическим породам орангской свиты, локализованным в СЗ-части территории. Породы восточной, СВ, ЮВ и южной частей изучаемой площади плохо выделяются на полученной литологической карте, вероятно, из-за мощных плиоцен-четвертичных отложений. Они распространены почти повсеместно и представлены комплексом морских, ледниково-морских, аллювиально-морских и континентальных образований. Их мощность зависит от рельефа коренных пород и отметок дневной поверхности, изменяясь в значительных пределах, достигая 450 м и более (Шишкин и др., 2008; Зылева и др., 2014). В целом расшифровка внутреннего строения ШП затруднено большой мощностью перекрывающих мезозойских отложений (до 500 м), представленных разнообразными осадочными породами.

## Заключение

Исследование позволило построить литологическую карту северного окончания восточного склона Полярного Урала, используя полученные с КА HLS-2 данные, а также современные методы обработки изо-



**Рис. 2.** Цветной композитный снимок MNF в ложных цветах (RGB: MNF 8a-3-2), полученный с помощью КС КА HLS-2 для исследуемой территории (а). Литологическая карта изучаемой территории (б), полученная путем визуальной интерпретации цветного композита MNF (RGB: MNF 8a-3-2) и экранной оцифровки:

1 — разрывные нарушения, выделенные с помощью КС КА HLS-2; 2, 3 — надвиг и взброснадвиг (2), в т. ч. рудоконтролирующий (3); 4–10 — соответствуют рис. 1; 11 — нерасчлененные четвертичные отложения; 12 — месторождение Юньягинское

**Fig. 2.** False-color composite MNF image (RGB: MNF 8a-3-2) from the HLS-2 satellite for the study area (a). Lithological map of the study area (b) obtained by visual interpretation of the MNF color composite (RGB: MNF 8a-3-2) and on-screen digitization: 1 — faults identified by the HLS-2 satellite; 2–3 — thrust and reversed thrust (2), ore-controlling (3); 4–10 — corresponds to Fig. 1; 11 — undifferentiated Quaternary sediments. 12 — Yunyaga deposit

бражений. Результаты демонстрируют перспективность использования космической съемки для геологического картирования в областях с гористым рельефом и минимальным покровом четвертичных отложений (до 6 м).

Сопоставление полученной литологической карты с существующими геологическими данными выявило высокую степень соответствия. Метаморфизованные породы четко выделяются по характерной цветовой гамме, варьирующейся от темно-синего до фиолетового. Ультраосновные породы надежно идентифицируются по красному цвету, а сочетание зеленого и синего оттенков указывает на районы распространения осадочных и метаморфических пород.

Для повышения точности и расширения области применения разработанной методики целесообразно объединить ее с другими методами обработки космической информации. Это позволит более эффективно выделять литологические единицы даже в тех районах, где мощность четвертичных отложений значительна.

Кроме того, крайне важна обязательная верификация полученных результатов с использованием данных полевых работ. Это позволит не только подтвердить достоверность литологической карты, но и выявить возможные ограничения и внести необходимые коррективы в алгоритм обработки изображений.

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

## Литература / References

- Викентьев И. В., Иванова Ю. Н., Нафигин И. О., Бортников Н. С. Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: первый опыт современного космического зондирования Земли // Доклады Академии наук. 2021. Т. 500. №2. С. 115–122. DOI:10.31857/S2686739721100170
- Vikentyev I. V., Ivanova Yu. N., Nafigin I. O., Bortnikov N. S. Structural position and typification of metasomatic zones, Polar Urals: the first experience of modern space sensing of the Earth. Doklady Earth Sciences, 2021, V. 500, No. 2, pp. 115–122. (in Russian)
- Зылёва Л. И., Коновалов А. Л., Казак А. П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е покол.). Сер. Зап.-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. Объяснит. зап. СПб.: Картограф. фабр. ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Zyleva L. I., Konovalov A. L., Kazak A. P. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). West Siberian Series. Sheet Q-42 — Salekhard: Explanatory Note. St. Petersburg: VSEGEI, 2014, 396 p. (in Russian)
- Душин В. А. Геологическое строение и магматизм Шучучинского мегаблока (Полярный Урал) // Известия УГГУ. 2020. Вып. 4(60). С. 35–56. DOI:10/21440/2307-2091-2020-4-35-56
- Dushin V. A. Geological structure and magmatism of the Shchuchinsky megablock (Polar Urals). Bulletin of the

- Ural State Mining University, 2020, 4(60), pp. 35–56. (in Russian)
- 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. DOI:10.31857/S0205961421050055
- Ivanova Yu. N., Vykhristenko R. I.* Structural control of gold mineralization on the eastern slope of the Polar Urals based on the analysis of multispectral images from the Landsat 8 spacecraft. *Earth Exploration from Space*, 2021, No. 6, pp. 60–73. (in Russian)
- Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И., Викентьев И. В.* Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Топугол-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019366-79>
- Ivanova Yu. N., Vykhristenko R. I., Vikentyev I. V.* Geological position and structural control of mineralization in the Toupugol-Khanmeishor region (Polar Urals) based on remote sensing results. *Exploration of the Earth from Space*, 2019, No. 3, pp. 66–76. (in Russian)
- Пучков В. Н., Иванов К. С.* Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектон. 2020. № 1. С. 41–61. DOI: 10.31857/S0016853X20010105
- Puchkov V. N., Ivanov K. S.* Tectonics of the Northern Urals and Western Siberia: general history of development. *Geotekton*, 2020, No. 1, pp. 41–61. (in Russian)
- 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). Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабр. ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Remizov D. N., Shishkin M. A., Grigoriev S. I., et al.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200000 (2nd ed., digital). Polar-Ural Series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus Mountain). Explanatory Note. SPb: VSEGEI Cartographic Factory, 2014, 256 p. (in Russian)
- Уляшева Н. С.* Состав и условия образования протолитов плагиогнейсов в Харбейском метаморфическом комплексе (Полярный Урал) // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2013. С. 14–19.
- Ulyasheva N. S.* Composition and Formation Conditions of Plagiogneiss Protoliths in the Kharbey Metamorphic Complex (the Polar Urals). *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2013, pp. 14–19. (in Russian)
- Шишкин В. А., Жигалов С. В., Грищенко Ш. Г.* Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200 000 (новая серия). Лист P-55-XII. Объяснительная записка. СПб., 2008.
- Shishkin V. A., Zhigalov S. V., Grishchenko Sh. G.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (new series). Sheet P-55-XII. Explanatory Note. St. Petersburg: 2008. (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. Vol. 477. No. 1. P. 1260–1264.
- 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. DOI:10.1134/S1028334X17110095
- Green A. A., Berman M., Craig M. D.* A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // *IEEE Trans. Geosci.* 1988. 26(1). P. 65–74. DOI:10.1109/36.3001
- Lakshmi Ram Prasath H., Kusuma K. N.* Lithological Mapping using Landsat 8 OLI and ASTER TIR Multispectral Data: A Comparative Study // *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*. 2018. V.7. Is. 1. P. 2728–2745. DOI:10.23953/cloud.ijarsg.369.
- Masek J. G., Claverie J., Ju. M.* et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018. 24 p.
- Sekandari M., Masoumi I., Beiranvand Pour A., M Muslim A.* et al. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sensing* 2020. 12. 1239. doi:10.3390/rs12081239

Поступила в редакцию / Received 31.10.2025