



Применение данных ASTER и методов многомерного анализа для прогнозирования меднопорфирового оруденения в условиях перекрытых территорий (на примере Крайчиковского рудопрооявления, Средний Урал)

Столяров И. О.^{1,2}, Гирфанов М. М.¹

¹ ЦНИГРИ, г. Москва, Россия; ² РУДН им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

Аннотация. Оценена эффективность мультиспектральных данных спутника Terra/ASTER для прогнозирования меднопорфирового оруденения на примере Крайчиковского рудопрооявления (Средний Урал) в условиях мощного осадочного чехла и густой растительности. Прямое применение минералогических индексов даёт картину, контролируемую ландшафтно-антропогенными факторами, что согласуется с мировым опытом. Показано, что метод главных компонент (PCA) эффективно нивелирует помехи. Идентифицированы ключевые компоненты: PC4 (маркирует разрывные нарушения и выходы коренных пород) и PC6 (прямой индикатор метасоматических изменений). Линеаментный анализ детализировал рудоконтролирующую структуру. На основе совмещения PC6 и PC4 синтезирована ранжированная карта перспективности с новыми участками. Обсуждаются причины успеха метода (выделение слабых независимых сигналов) и ограничения (техногенные помехи). Результаты подтверждают целесообразность адаптации методик ASTER с использованием PCA для ранних стадий ГРП на перекрытых территориях умеренного пояса.

Ключевые слова: ASTER, дистанционное зондирование, анализ главных компонент (PCA), меднопорфировое оруденение, Средний Урал, Крайчиковское рудопрооявление, спектральные индексы, линеаментный анализ.

Для цитирования: Столяров И. О., Гирфанов М. М. Применение данных ASTER и методов многомерного анализа для прогнозирования меднопорфирового оруденения в условиях перекрытых территорий (на примере Крайчиковского рудопрооявления, Средний Урал). Руды и металлы. 2026. № 2. С. 5–25. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10006.

Application of the ASTER data and multivariate analysis techniques to forecasting porphyry copper mineralization within territories under significant sedimentary and vegetation cover: The case of the Kraichikovo copper occurrence, Middle Urals

Stolyarov I. O.^{1,2}, Girfanov M. M.¹

¹ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI), Moscow, Russia;

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Annotation. Efficiency of Terra/ASTER satellite multispectral data as applied to forecast of porphyry copper mineralization under conditions of the thick sedimentary and dense vegetation cover was assessed on an example of the Kraichikovo occurrence (Middle Urals). Direct application of the mineralogical indices yielded only the patterns controlled by landscape and anthropogenic factors, which was consistent with the global experience. At the same time, it was demonstrated that the interfering factors were effectively suppressed using the principal component analysis (PCA) technique. The key components identified were PC4 (marking fault zones and bedrock exposures) and PC6 (representing a direct indicator of Al–OH containing metasomatic alterations). The ore-controlling structure was detailed by means of the lineament analysis. A map of ranked prospectivity with new target areas was synthesized based on integrating of the PC6 and PC4. Reasons for the success of the method (extraction of weak, statistically independent spectral signals) and its limitations (anthropogenic noise) are discussed. The results of the research confirm practicability of the adaptation of the PCA-based ASTER interpretation techniques for early-phase exploration at overcovered territories within the temperate zone.

Keywords: ASTER, remote sensing, principal component analysis (PCA), porphyry copper mineralization, Middle Urals, Kraichikovo ore occurrence, spectral indices, lineament analysis.

For citation: Stolyarov I. O., Girfanov M. M. Application of the ASTER data and multivariate analysis techniques to forecasting porphyry copper mineralization within territories under significant sedimentary and vegetation cover: The case of the Kraichikovo copper occurrence, Middle Urals. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 2. pp. 5–25. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10006.





Введение

В практике современных геологических исследований данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) перешли из разряда экспериментальных инструментов в категорию необходимых. Спутниковые платформы, такие как Landsat, Terra/ASTER, Sentinel-2, и гиперспектральные системы (PRISMA, EnMAP), предоставляя многоканальные изображения поверхности, открывают широкие возможности для специалистов в области наук о Земле [5]. Особенно актуально применение этих платформ на ранних (прогнозно-минерагенических и поисковых) стадиях геологоразведочных работ (ГРП) на цветные и благородные металлы, где они позволяют эффективно оценивать перспективность слабо изученных территорий и оптимизировать планирование поисковых работ даже в рамках известных рудных районов [6, 7].

Однако потенциал мультиспектральной съёмки в ГРП реализуется не в полной мере из-за ряда природных ограничений. Основными сдерживающими факторами являются густой растительный покров, скрывающий спектральные особенности пород, и мощный чехол рыхлых отложений, экранирующий коренные геологические образования [27]. Таким образом, наиболее информативными оказываются спутниковые снимки обнажённых или слабоперекрытых территорий, например аридных и семиаридных регионов, где успешно применяются как стандартные минералогические индексы, так и методы спектрального анализа [20, 23].

В последние годы возрос интерес к адаптации методов дистанционного зондирования для условий умеренного пояса [13, 26]. Активно развиваются подходы, направленные на «очистку» спектрального сигнала от влияния растительности и почв, включая методы спектрального расслоения (spectral unmixing), машинного обучения и, в частности, анализ главных компонент (РСА) в его различных модификациях [19, 27]. Эти методы показали свою эффективность для выявления слабых геохимических и минералогических аномалий под тонким чехлом [9].

В данной работе исследуется возможность применения классического РСА к данным спутника ASTER для прогноза и картирования в условиях района Крайчиковского меднопорфирового рудопроявления (Средний Урал). Метод анализа снимков ASTER, известный своей эффективностью для дешифрирования структур в аридных регионах [16, 20], в условиях умеренного пояса и перекрытой территории требует адаптации и верификации. Целью работы является оценка корректности и разработка методики интерпретации спектральных данных при наличии указанных ограничивающих факторов, а также сравнение эффективности метода использования прямых индексов и многомерного статистического анализа.

Объект исследований

Район Крайчиковского рудопроявления расположен в восточной части Среднего Урала. Выбор данного полигона для апробации методики прогнозирования на основе данных ASTER обусловлен комплексом факторов, характерных для слабоизученных и перекрытых территорий умеренного пояса: наличие мощного (до 70 м) чехла мезо-кайнозойских осадочных отложений, высокая степень залесённости, а также дискуссионность и фрагментарность существующих геологических построений [2]. Данные фондовых отчётов (Курочкин Ю. С., 1961; Вознесенский А. И. и др., 1995) свидетельствуют о существенных расхождениях в трактовке геологического строения. В этих условиях дистанционные методы могут выступить в роли инструмента, позволяющего получить новую независимую информацию о глубинном строении и минерагеническом потенциале территории.

В региональном тектоническом плане район исследований приурочен к восточной зоне Уральской складчатой системы, входящей в состав Увельско-Еленовского вулканоплутонического пояса (ВПП) (рис. 1). Этот пояс, сформированный в позднем девоне – раннем карбоне, трассирует зону сочленения Алапаевско-Теченского синклиория и Красногвардейского антиклиория [2] и характеризуется

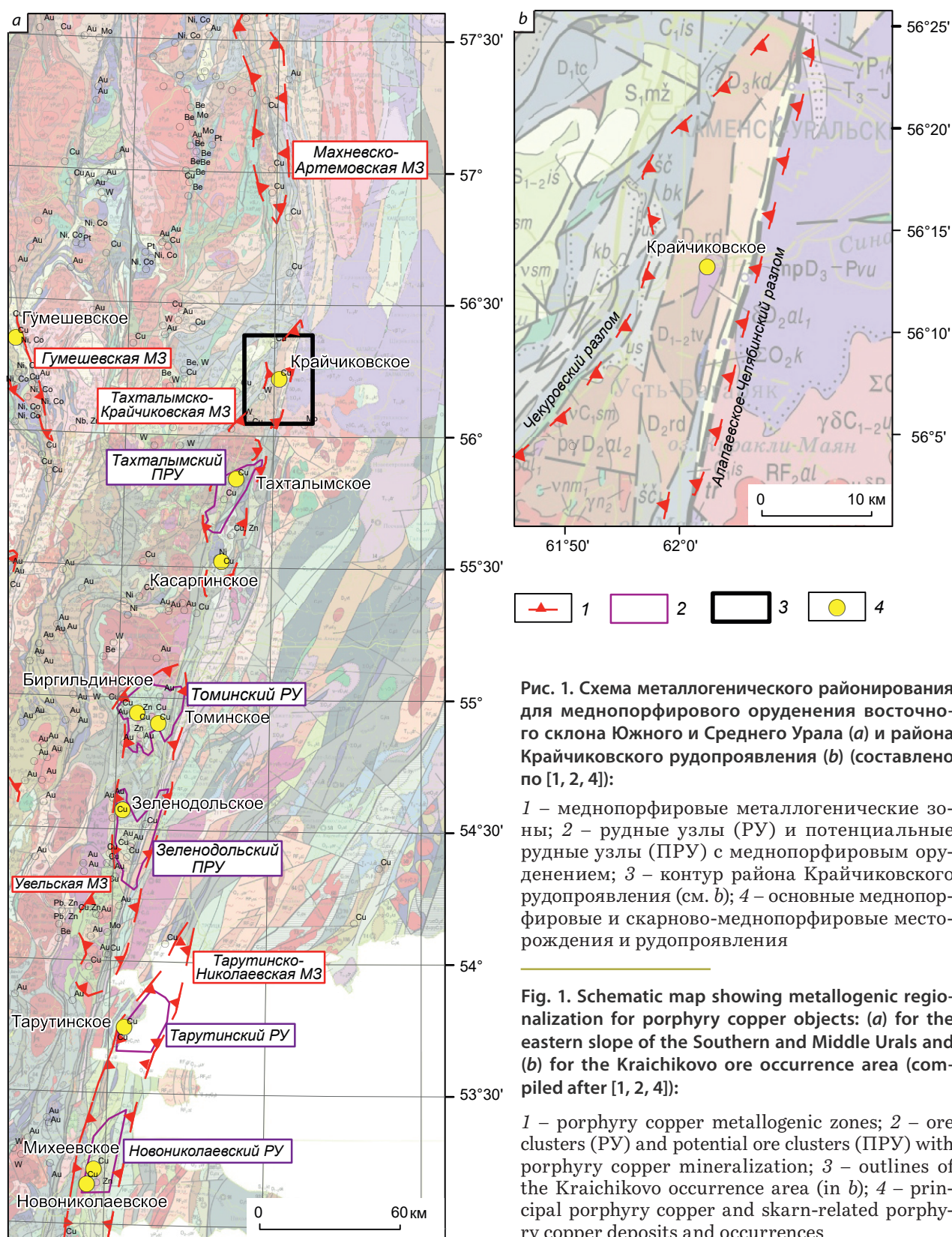


Рис. 1. Схема металлогенического районирования для меднопорфирового оруденения восточного склона Южного и Среднего Урала (а) и района Крайчиковского рудопроявления (б) (составлено по [1, 2, 4]):

1 – меднопорфировые металлогенические зоны; 2 – рудные узлы (РУ) и потенциальные рудные узлы (ПРУ) с меднопорфировым оруденением; 3 – контур района Крайчиковского рудопроявления (см. б); 4 – основные меднопорфировые и скарново-меднопорфировые месторождения и рудопроявления

Fig. 1. Schematic map showing metallogenic regionalization for porphyry copper objects: (a) for the eastern slope of the Southern and Middle Urals and (b) for the Kraichikovo ore occurrence area (compiled after [1, 2, 4]):

1 – porphyry copper metallogenic zones; 2 – ore clusters (PY) and potential ore clusters (ПРУ) with porphyry copper mineralization; 3 – outlines of the Kraichikovo occurrence area (in b); 4 – principal porphyry copper and skarn-related porphyry copper deposits and occurrences

широким развитием вулканогенных толщ базальт-андезит-риолитового состава и комагматичных им интрузивных образований гранодиорит-гранитовой и диоритовой формаций [1]. Именно с магматическими комплексами этого этапа на Урале связан основной объём меднопорфирового оруденения, включая крупное Томинское месторождение и ряд более мелких объектов [3, 4].

В пределах Увельско-Еленовского пояса на основе анализа геофизических данных и результатов предшествующих поисковых работ в последние годы выделяется Тахталымско-Крайчиковская меднопорфировая зона [4]. Она имеет субмеридиональное простирание, прослеживаясь вдоль западного крыла Алапаевско-Челябинского глубинного разлома, и объединяет ряд рудопроявлений и геохимических аномалий меди и молибдена. Крайчиковское рудопроявление рассматривается как один из перспективных объектов в пределах этой зоны. Структурный контроль зоны определяется её приуроченностью к области динамического влияния Алапаевско-Челябинского разлома – одной из главных рудоконтролирующих структур Урала. Субмеридиональные разломы этого направления служат главными рудоподводящими каналами, а оперяющие их нарушения северо-западного и северо-восточного простирания создают структурные ловушки, благоприятные для локализации штокверковых рудных тел.

В строении непосредственно Крайчиковского рудопроявления принимают участие сложно дислоцированные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы девона, прорванные многочисленными субвулканическими и гипабиссальными интрузивами. Анализ материалов предшествующих геолого-съёмочных работ масштаба 1 : 50 000, 1 : 200 000 и 1 : 1 000 000 [2], а также фондовых отчётов (Курочкин Ю. С., 1961; Вознесенский А. И. и др., 1995) свидетельствует о существенных расхождениях в трактовке геологического строения. Наиболее детальной и пригодной для целей данного исследования представляется модель, разработанная под руководством А. И. Вознесенского (1995). Именно она поло-

жена в основу схемы геологического строения, представленной на рис. 2.

Согласно этой модели, в геологическом строении района Крайчиковского рудопроявления выделяются три основные группы пород.

Интрузивные образования, потенциально продуктивные на меднопорфировое оруденение, объединены в *крайчиковский (алтынайский) гипабиссальный комплекс* ($D_{2-3}?$). Породы комплекса слагают штокообразные и дайкообразные тела, прорывающие вулканогенные толщи. В его составе выделяются две фазы. К первой фазе отнесены диорит-порфириты и кварцевые диорит-порфириты, образующие относительно крупные массивы и их апофизы в центральной части площади, с которыми пространственно и генетически связывается прожилково-вкрапленная медная минерализация. Вторую фазу представляют плагиогранит-порфиры и тоналит-порфиры, рудоносность которых достоверно не установлена. Кроме того, в состав комплекса иногда включают субвулканические тела риодацитов и риолитов (Вознесенский А. И. и др., 1995).

Девонские стратифицированные комплексы слагают вулканогенное обрамление интрузивов. В центральной части площади развиты породы крайчиковской ($D_2?$) и лавово-пирокластической ($D_3?$) толщ, представленные лавами, лавокластами и туфами базальтов и андезибазальтов, риолитами и дацитами.

Комплексы периферии рудопроявления представлены как более древними, так и более молодыми образованиями. На юге площади залегают терригенно-карбонатные отложения куракли-маянской толщи (D_{2-3}), к северо-востоку – развиты граниты акчаульского (C_3-P_1) и султаевского (C_2) комплексов, на западной и юго-западной периферии фрагментарно присутствуют вулканогенные отложения туринской свиты ($D_3?$) (базальты, их туфы, риодациты), нерасчленённые нижнекаменноугольные терригенно-карбонатные толщи, а также метаморфические сланцы улу-гушской свиты ($O?$).

Тектоническая структура района определяется его положением в зоне сочленения

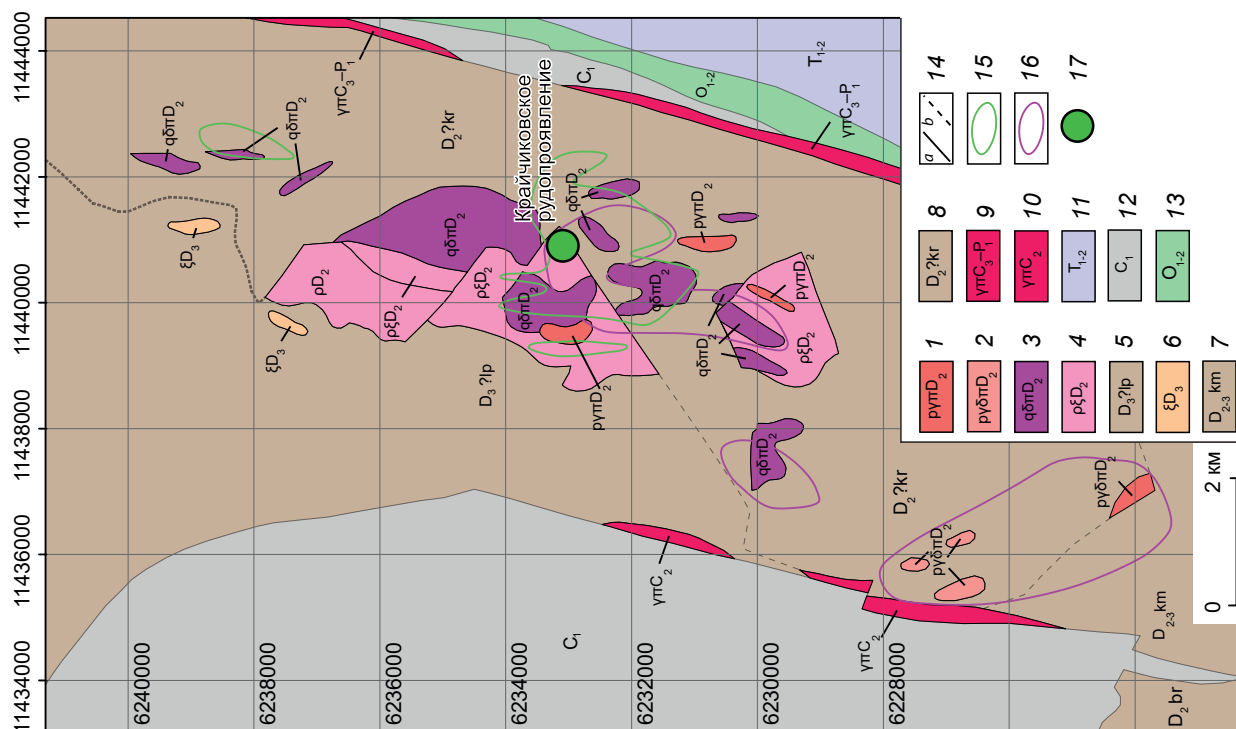


Рис. 2. Геологическое строение района Крайчиковского рудопрооявления (составлено по материалам А. И. Вознесенского и др., 1995):

1–4 – крайчиковский гипабиссальный (субвулканический) комплекс (потенциально продуктивный): 1 – плагиогранит-порфиры, 2 – тоналит-порфиры, 3 – диорит-порфиры, 4 – кварцевые диорит-порфиры, 5–8 – девонские субвулканические тела риодацитов и риолитов; 9 – 10 – туринские стратифицированные комплексы (потенциально рудовмещающие): 5 – лавово-пирокластическая толща (базальты, андезитобазальты, их туфы), 6 – субвулканическая толща дацитов, 7 – куракли-маянская толща (аргиллиты, мергели, известняки, туфы), 8 – крайчиковская толща (базальты, риолиты, дациты); 9, 10 – интрузивные комплексы периферии: 9 – акчаульский комплекс (гранит-порфиры), 10 – султаевский комплекс (лейкограниты, гранит-порфиры); 11–13 – стратифицированные комплексы периферии: 11 – туринская свита (базальты, риодациты, туфы), 12 – нижнекамменноугольные толщи (терригенно-карбонатные), 13 – улугушская свита (сланцы, микрокварциты); 14 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые; 15 – геохимические аномалии меди (0,015–0,3 %); 16 – геохимические аномалии молибдена (0,001–0,1 %); 17 – Крайчиковское рудопрооявление

Fig. 2. Geological map of the Kraichikovo ore occurrence area (modified after A. I. Voznesensky et al., 1995):

Kraichikovo hypabyssal (subvolcanic) complex (potentially productive): 1 – plagiogranite porphyries, 2 – tonalite porphyries, 3 – diorite porphyries, 4 – quartz diorite porphyries, 5 – 8 – subvolcanic bodies of rhyodacites and rhyolites; Devonian stratified complexes (potentially ore-hosting): 5 – lava-pyroclastic sequence (basalts, andesibasalts, their tufts), 6 – subvolcanic bodies of dacites, 7 – Kurakli-Mayan sequence (mudstones, marls, limestones, tufts), 8 – Kraichikovo sequence (basalts, rhyolites, dacites); peripheral intrusive suites: 9 – Akchaul Suite (granite porphyries), 10 – Sultaev Suite (leucogranites, granite porphyries); peripheral stratified complexes: 11 – Turinskaya Formation (basalts, rhyodacites, tufts), 12 – Lower Carboniferous sequences (terrigenous-carbonate), 13 – Ulugush Formation (schists, microquartzites); 14 – geological boundaries: a – reliable, b – inferred; 15 – copper geochemical anomalies (Cu 0.015–0.3 %); 16 – molybdenum geochemical anomalies (Mo 0.001–0.1 %); 17 – Kraichikovo ore occurrence





крупных блоков земной коры. Породы часто интенсивно дислоцированы разрывной тектоникой и приразломной складчатостью. Главную роль играют субмеридиональные разломы, параллельные Алапаевско-Челябинскому глубинному разлому, которые контролируют размещение интрузивных тел крайчиковского комплекса. Широко развиты также диагональные разломы северо-западного и северо-восточного простираний, зоны пересечения которых с субмеридиональными структурами являются наиболее перспективными для локализации рудной минерализации.

Крайчиковское рудопоявление было выявлено в 1950-х годах при проходке колодца, где были вскрыты зоны сульфидизации. Первоначально, на основе изучения небольшого объема керна, объект интерпретировался как колчеданный и был отнесен к разряду непромышленных (Курочкин Ю. С., 1961). Позднее, в ходе геолого-съемочных работ, в пределах площади был закартирован ряд геохимических аномалий меди (с содержаниями от 0,015 до 0,3 %) и молибдена (от 0,001 до 0,1 %), пространственно приуроченных к выходам пород крайчиковского комплекса (Вознесенский А. И. и др., 1995).

В современной трактовке, основанной на пересмотре геологии района с позиций рудно-формационного анализа, Крайчиковское рудопоявление рассматривается в качестве объекта меднопорфирового типа [1, 4]. Оруденение, по аналогии с Томинским месторождением, связывается с малыми интрузиями диорит-порфиров, кварцевых диорит-порфиров и тоналит-порфиров, для которых характерны дорудные и внутрирудные гидротермальные изменения, включая серицитизацию, окварцевание и сульфидизацию.

В настоящее время на Крайчиковском рудопоявлении проводятся поисковые работы, которые позволяют установить перспективы его промышленной рудоносности.

Методика исследования

В работе использованы данные спутника ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) уровня обработки

Level 1T (ортокорректированные сцены). Выбор обусловлен уникальными спектральными возможностями этой системы: ASTER регистрирует электромагнитное излучение в 14 каналах (табл. 1). ASTER остаётся одной из немногих мультиспектральных систем, специально ориентированных на геологические задачи и продолжающих предоставлять данные, пригодные для регионального минералогического картографирования.

VNIR (Visible and Near Infrared) – каналы видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Наибольшее значение для геологических исследований имеет соотношение каналов 2 и 1, позволяющее картировать зоны окисления железа. Также VNIR чувствителен к хлорофиллу зелёной растительности – основному источнику «шума» в данных.

Ключевым преимуществом сенсора ASTER перед предшествующими мультиспектральными системами является наличие шести спектральных каналов в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR, Short-Wave Infrared; 1,60–2,43 мкм) [6, 13]. Это позволяет не просто фиксировать наличие гидроксилсодержащих минералов, а различать их типы на основе фундаментальных колебательных процессов в кристаллической решётке [20].

Спектральные характеристики минералов в области 1,60–2,43 мкм обусловлены обертонами и составными частотами фундаментальных колебаний атомных связей [8]. В отличие от видимого диапазона (VNIR), где доминируют электронные переходы, в SWIR регистрируются исключительно колебательные процессы [10].

Диагностика гидротермальных минералов по данным ASTER SWIR базируется на групповой принадлежности, определяемой типом колебательной связи и положением полосы поглощения (табл. 2) [20].

TIR (Thermal Infrared) – пять каналов теплового диапазона, регистрируют собственное тепловое излучение поверхности. Кварц и безводные силикаты имеют специфические особенности эмиссии (так называемый рестрален-эффект), что используется для прямого выделения кварцсодержащих пород.



Табл. 1. Спектральные характеристики каналов сенсора ASTER (составлено по [6, 27])

Table 1. Spectral characteristics of ASTER sensor channels (compiled after [6, 27])

Диапазон	Номер канала (В)	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
Видимый и ближний инфракрасный (VNIR)	1	0,52–0,60	15
	2	0,63–0,69	15
	3	0,78–0,86	15
Коротковолновый инфракрасный (SWIR)	4	1,600–1,700	30
	5	2,145–2,185	30
	6	2,185–2,225	30
	7	2,235–2,285	30
	8	2,295–2,365	30
	9	2,360–2,430	30
Тепловой инфракрасный (TIR)	10	8,125–8,475	90
	11	8,475–8,825	90
	12	8,925–9,275	90
	13	10,250–10,950	90
	14	10,950–11,650	90

Табл. 2. Диагностические полосы поглощения и соответствующие каналы ASTER для основных типов гидротермальных изменений (составлено по [23])

Table 2. Diagnostic absorption bands and the corresponding ASTER channels for main hydrothermal alteration types (compiled after [23])

Зона изменений	Группа минералов	Ключевые минералы	Диагностическая полоса, мкм	Канал ASTER
Аргиллизация	Глинистые минералы (Al–OH)	Каолинит, алунит	2,17	5
Филлизитизация	Слюды (Al–OH)	Мусковит (серицит), иллит	2,20	6
Пропилитизация	Хлориты/Эпидот (Fe,Mg–OH)	Хлорит, эпидот	2,32–2,35	8
Карбонатизация	Карбонаты (CO ₃)	Кальцит, доломит	2,33–2,35 (кальцит), 2,30–2,32 (доломит)	7 (кальцит), 8 (доломит)

Для обработки были отобраны покрывающие район Крайчиковского рудопроявления две сцены с минимальным облачным покровом. Использованы сцены ASTER уровня L1T с идентификаторами AST_07XT_00405282004 070732 (VNIR+SWIR) и AST_09T_0040528200

4070732, датированные 28 мая 2004 г. Выбор данных указанного периода обусловлен тем, что SWIR-сенсор ASTER сохранял работоспособность до апреля 2008 г., что гарантирует отсутствие аппаратных артефактов в коротковолновом инфракрасном диапазоне [6].

Отобранные сцены характеризуются полным отсутствием облачного покрова, что подтверждено визуальным контролем RGB-композиций (B3/B2/B1) и анализом значений яркости в VNIR-каналах. В связи с этим дополнительная маскировка облаков и теней не требовалась.

На первом этапе выполнен расчёт четырёх спектральных индексов, традиционно применяемых для выделения минералогических аномалий, характерных для меднопорфировых систем:

1. Индекс глинистых минералов (Clay Minerals Index, CMI): B5/B6. Канал 5 (2,145–2,185 мкм) расположен в зоне высокого отражения для большинства диоктаэдрических глинистых и слюдистых минералов, тогда как канал 6 (2,185–2,225 мкм) приходится на интенсивную полосу поглощения, обусловленную колебаниями связи Al–OH. Высокие значения индекса указывают на присутствие каолинита, иллита, монтмориллонита – типичных продуктов гидротермального изменения. В работе Jellouli и др. (2025) [15] данный индекс успешно применён для картирования зон серицитизации и аргиллитизации в пределах медного пояса Антиатласа.

2. Индекс оксидов железа (Iron Oxide Index, IOI): B2/B1. В видимом диапазоне оксиды и гидроксиды трёхвалентного железа (гематит, гётит, ярозит) характеризуются резким ростом отражательной способности от синей (канал 1) к красной (канал 2) области спектра. Отношение B2/B1 позволяет картировать зоны окисления и гипергенеза, часто сопутствующие рудной минерализации [16].

3. Индекс карбонатов (Carbonate Index, CI): B7/B8. Канал 7 (2,235–2,285 мкм) – референсное положение вне полос поглощения, в то время как канал 8 (2,295–2,365 мкм) совпадает с фундаментальной полосой поглощения CO₃-группы в кальците, доломите, магнезите [12]. Повышенные значения индекса маркируют зоны карбонатизации и прожилково-вкрапленной минерализации.

4. Индекс кварца для TIR-диапазона (Quartz Index, QI): (B11×B11)/(B10×B12). Кварц отличается так называемым рестрален-минимумом –

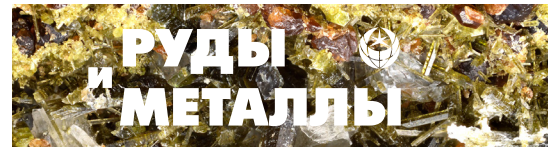
резким падением эмиссии в интервале 8–10 мкм. Канал 11 (8,475–8,825 мкм) расположен вблизи минимума кварца [20], каналы 10 и 12 – на склонах полосы поглощения. Индекс позволяет идентифицировать кварцсодержащие породы. Исследования в провинции Курнамона (Австралия) показали, что подобные TIR-индексы, несмотря на качественный характер результатов, способны выявлять зоны окварцевания даже на региональном уровне [22]. Следует отметить, что данный индекс не является строго специфичным для кварца и может давать положительные значения также для полевых шпатов и пироксенов [20], что необходимо учитывать при интерпретации.

Методология расчёта индексов опирается на подходы, изложенные в базовом руководстве Kalinowski и Oliver [16] и впоследствии апробированные в различных рудных районах мира.

В условиях развитого почвенно-растительного покрова спектральный вклад коренных пород составляет, как правило, менее 5 % от суммарного сигнала пикселя. В результате рассчитанные карты индексов отражают преимущественно ландшафтные особенности. Данные ограничения отмечаются в работах И. О. Нафигина и др. (2023) для территории Забайкалья, где прямое применение спектральных индексов без статистической обработки также привело к доминированию «растительного» сигнала [5]. Для подавления этих мешающих факторов применён метод главных компонент (PCA) – ортогональное линейное преобразование, которое переводит набор коррелированных спектральных каналов в новый набор некоррелированных переменных – главных компонент. Компоненты упорядочены по убыванию доли объяснённой дисперсии и представляют собой взвешенные суммы исходных каналов [18, 24].

В геологических задачах PCA используется как инструмент разделения спектральных сигналов разных природных объектов, основанный на различии формы их спектральных кривых. Этот метод решает две главные задачи:

1. Сепарация источников дисперсии. Так, первая компонента (PC1) всегда отражает



доминирующий тип поверхности (на залесённых территориях это растительность), вторая и третья (PC2, PC3) аккумулируют сигналы почв, увлажнения и рельефа. Компоненты высокого порядка (PC4–PC6) содержат остаточную дисперсию, которая не объясняется ландшафтными факторами. При корректном анализе именно в них концентрируется сигнал от коренных пород и гидротермальных изменений [20].

2. Устранение мультиколлинеарности и усиление слабых признаков. Каналы ASTER (особенно SWIR) сильно коррелированы: соседние каналы несут сходную информацию. PCA устраняет эту избыточность, создавая ортогональные (некоррелированные) компоненты. Каждая последующая компонента содержит то, чего нет в предыдущих. Благодаря этому даже слабые, но диагностически важные полосы поглощения (например, Al–OH в канале 6), которые в исходных каналах составляют доли процента от общего сигнала, становятся доминирующими в одной из поздних компонент [5].

Каждая компонента интерпретируется через факторные нагрузки – коэффициенты вклада исходных каналов. Так, например, высокая нагрузка на канал 6 при отрицательной нагрузке на канал 5 указывает на вариации Al–OH (мусковит, иллит), высокая нагрузка на канал 8 – на CO₃ или Mg,Fe–OH (карбонаты, хлориты) [19].

В рамках данной работы PCA применялся отдельно для каналов VNIR+SWIR (1–9) и отдельно для каналов TIR (10–14) (табл. 1). Для каждого набора каналов вычислялась ковариационная матрица и выполнялось разложение на собственные векторы. Результатом являются главные компоненты и соответствующие им факторные нагрузки (eigenvector loadings) – коэффициенты, с которыми каждый исходный канал входит в состав компоненты. Анализ факторных нагрузок позволяет перейти от математического преобразования к геологической интерпретации [25]. Компонента считалась геологически значимой, если демонстрировала высокие (по модулю) нагрузки на каналы, соответствующие диагностическим полосам поглощения/отра-

жения минералов-индикаторов гидротермальной системы. Аналогичный подход к интерпретации нагрузок при литологическом картировании продемонстрировал высокую эффективность при работе с ASTER-данными в Северной Африке и Австралии [6, 13].

Дополнительная атмосферная коррекция не выполнялась, поскольку для метода главных компонент её влияние на результат минимально, а использование относительных калибровок при расчёте индексов позволяет частично компенсировать атмосферные эффекты. Тем не менее этот фактор учтён как возможное ограничение метода.

Поскольку локализация гидротермальной минерализации часто контролируется зонами повышенной проницаемости, дополнительно был выполнен линеаментный анализ территории. Его цель – выявление зон тектонической трещиноватости, которые могли служить рудоподводящими и рудоконтролирующими структурами. Основой для выделения линеаментов послужил RGB-композит, синтезированный из главных компонент PC4, PC2 и PC1, где сочетание компонент высокого и низкого порядка позволило подчеркнуть структурно-текстурные особенности пород. К полученному композиту был применён фильтр Собеля – оператор выделения границ, основанный на оценке градиента яркости пикселей. Применение фильтра Собеля совместно с PCA является эффективным подходом для выделения линеаментов, что подтверждено исследованиями на различных геологических объектах [25]. Фильтр позволил усилить линейные элементы изображения, соответствующие зонам трещиноватости, контактам пород и тектоническим нарушениям. На основе отфильтрованного изображения методом порогового разделения (thresholding) создан бинарный растр. Полученная растровая основа была векторизована с учётом геологической согласованности выделяемых структур: удалялись техногенные и ложные линии, не связанные с геологическим строением. На завершающем этапе построена карта плотности линеаментов методом интерполяции (kernel density), позволившая выделить участки максимальной тектонической проницаемости [9].

Вычисление минералогических индексов, PCA и линеаментный анализ производились с использованием программного обеспечения ESRI ArcMap 10.8 и QGIS.

Результаты

В ходе работы был выполнен комплексный анализ мультиспектральных данных ASTER, включающий расчёт стандартных минералогических индексов, метод главных компонент, линеаментный анализ и интеграцию полученных данных в прогнозную схему. Ниже представлены результаты каждого этапа обработки.

Первым этапом спектрального анализа стал расчёт общепризнанных минералогических индексов, направленных на прямое выявление зон гидротермальных изменений, характерных для меднопорфировых систем [16, 20].

Визуализация полученных индексов (рис. 3) показала, что их распределение на площади полигона контролируется преимущественно ландшафтными и антропогенными факторами. В то же время геологический контроль носит второстепенный характер, что согласуется с результатами исследований в других залесённых регионах умеренного пояса [26].

Индекс глинистых минералов (B5/B6) демонстрирует отчётливую приуроченность максимальных значений к бортам и днищам долин рек Синара и Исток, антропогенным объектам, а также к береговым линиям озёр и водохранилищ. Данное распределение указывает на то, что высокие значения индекса связаны не с гидротермальными серицитовыми изменениями, а с выходом на дневную поверхность или близким залеганием глинистых толщ мезо-кайнозойского осадочного чехла. Чёткой пространственной связи аномалий индекса с контурами известного Крайчиковского рудопроявления не установлено.

Индекс карбонатов (B7/B8) характеризуется неоднородным, пятнистым распределением. Относительные максимумы фиксируются в долине р. Синара, в западной периферийной части полигона, а также локально в районе устья р. Исток и в пределах водораздельных пространств южной и восточной части площади. Однако аномалия в районе рудопроявления не является доминирующей.

Индекс оксидов железа (B2/B1) даёт наиболее контрастную, но геологически дезориентирующую картину. Абсолютные максимумы значений приурочены к территориям шламохранилищ в северной части полигона, что является примером техногенной помехи. На остальной территории локальные повышения индекса коррелируют исключительно с безлесными участками (пашни, луга), где проявляется почвенный покров, обогащённый оксидами железа.

Индекс кварца для TIR-диапазона выявляет несколько обширных зон с повышенными значениями. Одна из таких зон в центральной части площади пространственно совпадает с предполагаемым контуром рудоносного интрузивного массива. Однако интерпретация осложняется наличием других, не менее выраженных аномалий.

Прямое применение стандартных минералогических индексов на данных ASTER для условий Крайчиковского полигона приводит к формированию карт, содержание которых контролируется ландшафтными и антропогенными факторами. Геологический сигнал полностью маскируется этими доминирующими процессами, что подтверждает необходимость более сложных методов анализа [26].

Для преодоления указанных ограничений был применён классический анализ главных компонент [16] (табл. 3). PCA проводился раздельно для наборов каналов VNIR+SWIR (1–9) и TIR (10–14) (см. табл. 1). Интерпретация компонент выполнялась на основе анализа факторных нагрузок (eigenvectors) [9].

Анализ факторных нагрузок для каналов VNIR+SWIR (табл. 4) показывает, что PC1 и PC2 отражают распределение растительности: PC1 разделяет залесённые и открытые участки, PC2 является прямой «растительной» компонентой с максимальной нагрузкой на канал 3 (0,8504).

PC3 с экстремально высокой отрицательной нагрузкой на канал 2 (-0,8011) чувствителен к присутствию оксидов железа, что подтверждается литературными данными [16].

PC4 (рис. 4, а) характеризуется доминирующей положительной нагрузкой на канал 4

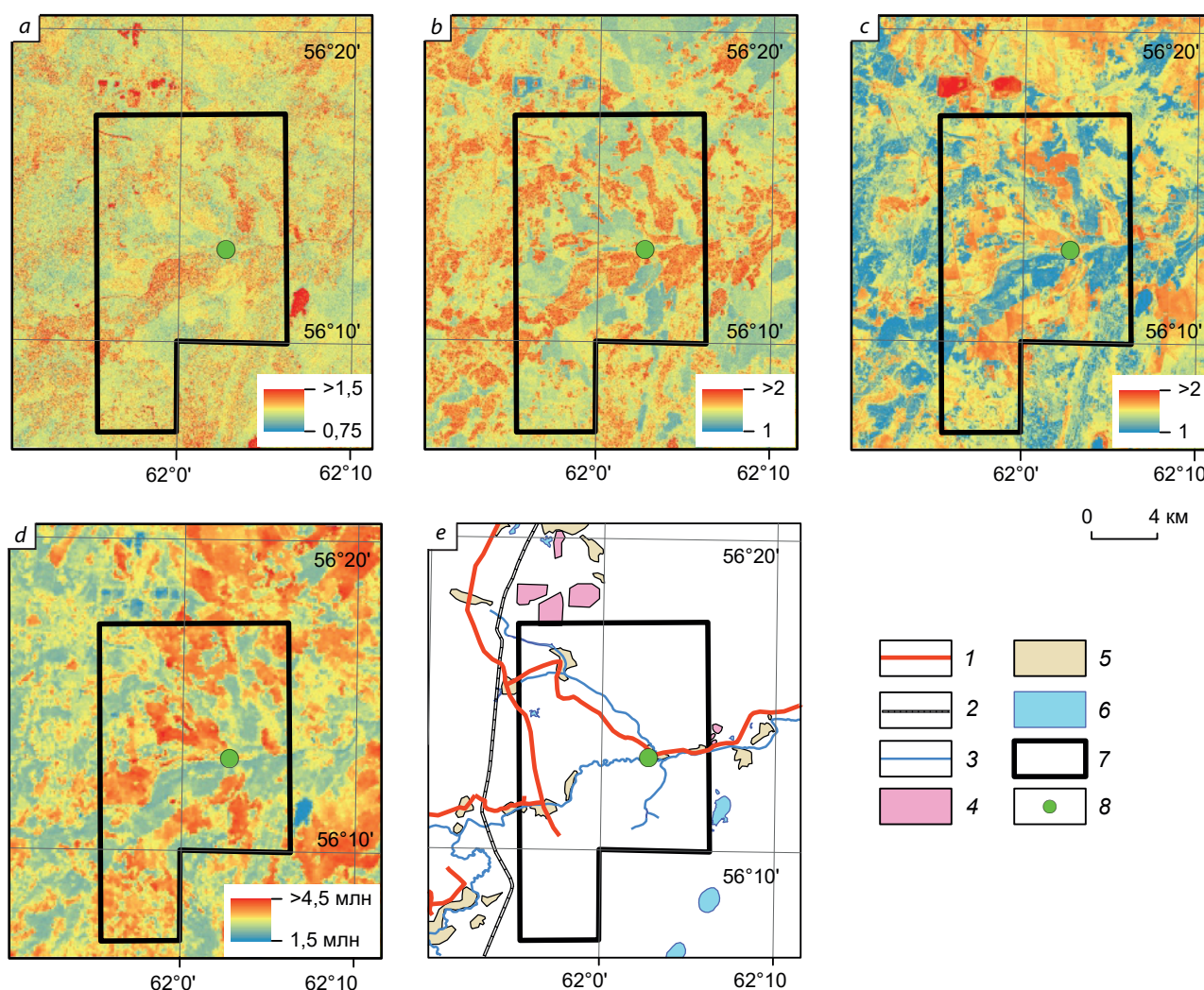


Рис. 3. Карты минералогических индексов, рассчитанных по данным ASTER, демонстрирующие доминирование ландшафтных и техногенных факторов:

a – индекс глинистых минералов (B5/B6): максимумы приурочены к долинам рек (глинистые отложения чехла); *b* – индекс карбонатов (B7/B8): пятнистое распределение, локальные максимумы в долинах; *c* – индекс оксидов железа (B2/B1): абсолютные максимумы на техногенных объектах (шламохранилища); *d* – индекс кварца (TIR): зоны повышения в центральной части; *e* – схема дешифрирования природных антропогенных объектов, оказывающих влияние на распределение значений минералогических индексов; 1 – автодороги; 2 – железные дороги; 3 – водотоки; 4 – карьеры и шламохранилища; 5 – населённые пункты; 6 – водоёмы; 7 – контур геологической карты (см. рис. 2); 8 – Крайчиковское рудопроявление

Fig. 3. Maps of the mineralogical indices derived from ASTER data, demonstrating the dominance of landscape and technogenic factors:

a – clay mineral index (B5/B6): the maximum values confined to river valleys (clayey sediments of the cover); *b* – carbonate index (B7/B8): patchy distribution with local maxima in the valleys; *c* – iron oxide index (B2/B1): the absolute maxima correspond to technogenic objects (tailings ponds); *d* – quartz index (TIR): elevated zones are in the central part; *e* – interpretation scheme of natural and anthropogenic objects influencing distribution of the mineralogical indices values; 1 – roads; 2 – railways; 3 – watercourses; 4 – open pits, tailings ponds; 5 – settlements; 6 – water bodies; 7 – outline of the geological map (Fig. 2); 8 – Kraichikovo ore occurrence

Табл. 3. Результаты анализа главных компонент (PCA) для каналов VNIR+SWIR ASTER

Table 3. Results of Principal Component Analysis (PCA) for ASTER VNIR+SWIR bands

РС слой	Вклад в дисперсию, %	Накопленный вклад, %
PC1	68,63	68,63
PC2	25,96	94,59
PC3	3,77	98,36
PC4	1,46	99,82
PC5	0,09	99,91
PC6	0,09	100,00

Примечание: жирным шрифтом выделены компоненты, несущие основную геологическую информацию.

(0,8260). Канал 4 (1,65 мкм) является индикатором сухих, слабо выветрелых минеральных поверхностей [14]. Данная компонента отражает участки с маломощным чехлом и выходами коренных пород, что в условиях района позволяет использовать её в качестве косвенного индикатора зон повышенной трещиноватости, разрывных нарушений и участков с маломощным чехлом.

PC6 оказалась наиболее диагностически значимой для прогноза оруденения. Её факторные нагрузки характеризуются резко отрицательной нагрузкой на канал 6 (-0,6423) при умеренной отрицательной нагрузке на

канал 5 (-0,3868). Такое сочетание максимизирует контраст между объектами с сильным и слабым поглощением в области 2,20 мкм – диагностическом признаке Al–ОН-содержащих слоистых силикатов (серицит, иллит, каолинит) [20, 23].

Хотя факторные нагрузки на B5 и B6 имеют одинаковый знак, интерпретация PC6 как индикатора Al–ОН основана на том, что эти два канала сильно коррелированы с фоном, а их разность (глубина поглощения) вычитается при формировании компоненты. Для проверки был рассчитан спектральный контраст $(B5-B6)/(B5+B6)$, который показал пространственную сходимость с аномалиями PC6, что подтверждает связь последней с поглощением в области 2,20 мкм.

Визуализация PC6 (рис. 4, b) дала следующие результаты:

- Наиболее яркая аномалия (высокие значения) совпадает с положением Крайчиковского рудопрооявления.
- Выявлен ряд изолированных аномалий к западу от Крайчиковского рудопрооявления, ранее не известных.
- Зафиксированы аномалии на техногенных объектах (карьер, шламохранилища), которые исключены из прогнозного анализа.

Анализ корреляционной матрицы подтвердил высокую взаимную корреляцию TIR-каналов ($r > 0,99$). В связи с крайне низким вкладом канала 14 в главные компоненты (табл. 5),

Табл. 4. Факторные нагрузки (eigenvectors) главных компонент для каналов VNIR+SWIR ASTER

Table 4. Eigenvector loadings of principal components for ASTER VNIR+SWIR bands

Канал	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
B1	0,1058	0,1601	-0,4955	-0,0675	0,2713	0,0997
B2	0,2043	0,1714	-0,8011	-0,0558	-0,1655	-0,0564
B3	-0,4534	0,8504	0,1180	-0,2326	-0,0206	-0,0255
B4	0,3274	0,3909	0,1022	0,8260	-0,0170	0,1878
B5	0,3817	0,1338	0,1394	-0,1632	0,7313	-0,3868
B6	0,4047	0,1611	0,1413	-0,0683	-0,4367	-0,6423
B7	0,3309	0,1463	0,1178	0,3027	-0,2676	0,4816
B8	0,3807	0,1521	0,1021	0,2851	-0,2631	0,3717
B9	0,3412	0,1395	0,0987	0,2914	-0,2528	0,3421

Примечание: жирным шрифтом выделены максимальные нагрузки, определяющие геологический смысл компонент.

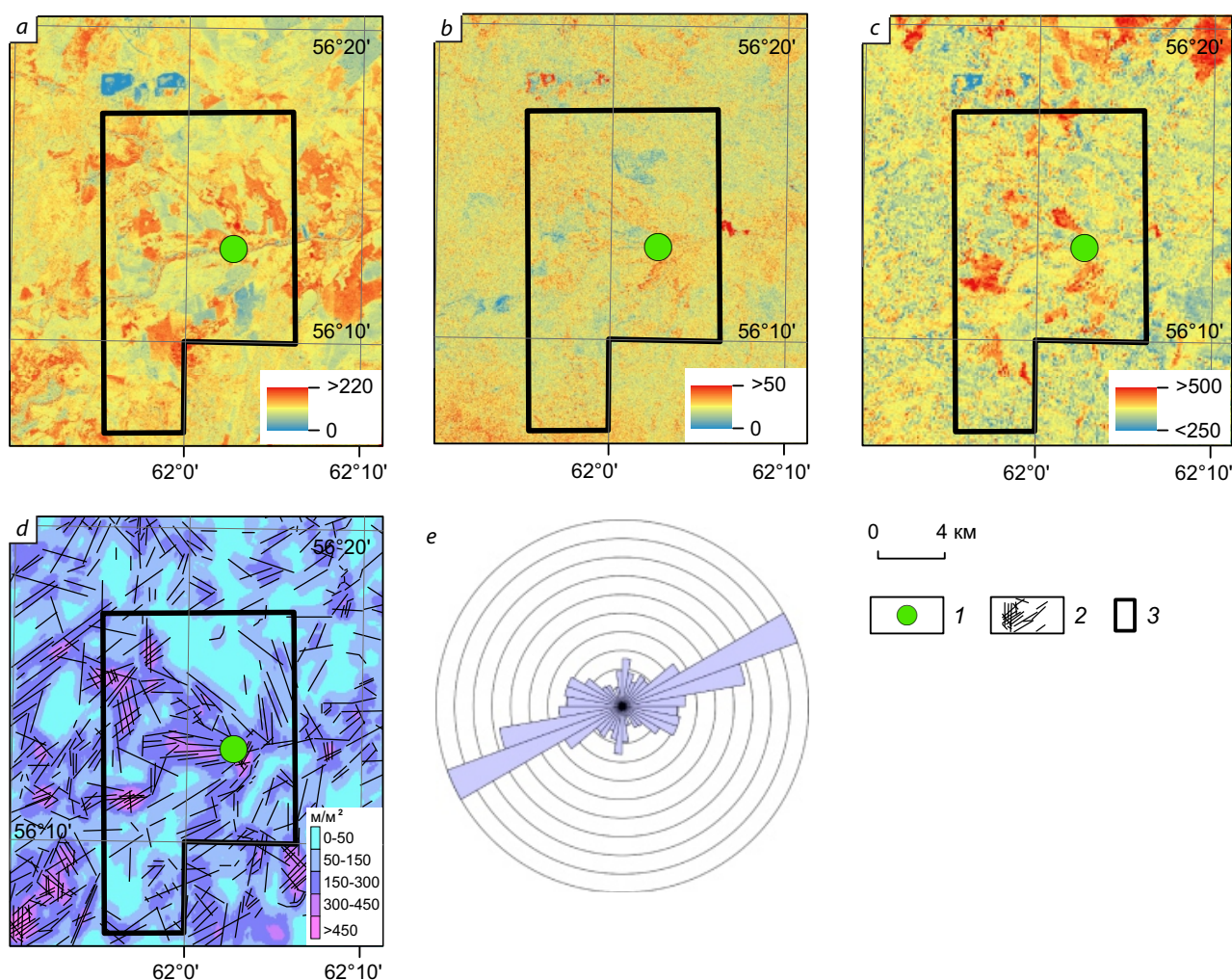


Рис. 4. Результаты анализа главных компонент и линейментного дешифрирования:

a – компонента PC4 (литоструктурный индикатор): светлые тона соответствуют участкам с маломощным чехлом и зонам разрывных нарушений; *b* – компонента PC6 (индикатор Al–OH минералов): высокие значения маркируют зоны серицитизации; *c* – компонента PC2 (TIR): индикатор вариаций кремнезёма, подчёркивающий крупные интрузивы; *d* – карта плотности линейментов (метод kernel density); *e* – роза-диаграмма ориентировки линейментов (главные направления: субмеридиональное 350–10° и северо-восточное 60–70°); 1 – Крайчиковское рудопоявление; 2 – линейменты; 3 – контур геологической карты (см. рис. 2)

Fig. 4. Results of the principal component analysis and lineament interpretation:

a – PC4 component (lithostructural indicator): light tones correspond to areas with thin overburden and fault zones; *b* – PC6 component (indicator of Al–OH minerals): dark tones (negative positive values) mark sericitization zones; *c* – PC2 (TIR) component: indicator of silica content variations, highlighting large intrusions; *d* – lineament density map (kernel density method); *e* – rose diagram of lineament orientations (main trends: submeridional 350–10° and northeastern 60–70°). The green circle on fragments *a–d* shows location of the Kraichikovo ore occurrence

Табл. 5. Результаты анализа главных компонент (PCA) для TIR-каналов ASTER (B10–B13)

Table 5. Results of Principal Component Analysis (PCA) for ASTER TIR bands (B10–B13)

PC слой (TIR)	Вклад в дисперсию, %	Накопленный вклад, %
PC1	99,55	99,55
PC2	0,30	99,85
PC3	0,11	99,96
PC4	0,04	100,00

Примечание: жирным шрифтом выделена компонента, несущая основную геологическую информацию.

Табл. 6. Факторные нагрузки (eigenvectors) главных компонент для TIR-каналов ASTER (B10–B13)

Table 6. Eigenvector loadings of principal components for ASTER TIR bands (B10–B13)

Канал	PC1 (TIR)	PC2 (TIR)	PC3 (TIR)	PC4 (TIR)
B10	0,4706	-0,4384	-0,7174	0,2148
B11	0,4498	-0,3211	0,1891	-0,6895
B12	0,4260	-0,3094	0,6524	0,5345
B13	0,4499	0,4528	0,0753	-0,3270

Примечание: жирным шрифтом выделена максимальная нагрузка, определяющая геологический смысл компоненты PC2 (TIR). Высокая нагрузка на канал 13 при умеренных нагрузках на каналы 10–12 интерпретируется как индикатор вариаций содержания кремнезёма.

в табл. 6 приведены результаты только для каналов 10–13.

PC1 (TIR) является картой радиационной температуры. Геологически значимой является PC2 (TIR), демонстрирующая контраст между каналами 10–12 и 13, что связывают с вариациями содержания кремнезёма [21]. PC2 подчёркивает контуры крупных интрузивных тел (рис. 4, с), однако для картирования локальных рудных зон её информативность ниже, чем у компонент SWIR-диапазона.

Для выявления зон тектонической проницаемости выполнен линеаментный анализ по RGB-композиту из главных компонент PC4, PC2 и PC1 [25]. К композиту применён фильтр Собеля с последующей векторизацией линейных элементов. Всего выделено и оцифровано 593 линеамента общей протяжённостью около 860 км (рис. 4, d).

Анализ розы-диаграммы распределения линеаментов (рис. 4, e) позволяет выделить две основные системы разрывных нарушений. Первая система представлена субмеридиональными разломами (350–10°), пространственно связанными с Алапаевско-Челябинским глубинным разломом и Чекуровским разломом. Данные структуры являются главными рудоконтролирующими элементами регионального уровня. Вторая, доминирующая система представлена оперяющими разлома-

ми северо-восточного простирания (60–70°). Пространственно эти нарушения приурочены к западному крылу Алапаевско-Челябинского разлома и восточному крылу Чекуровского разлома.

На основе векторизованной сети построенная карта плотности линеаментов методом kernel density [9], позволившая выделить участки максимальной тектонической проницаемости. Выявлена асимметрия в распределении плотности: низкая плотность к востоку от Алапаевско-Челябинского разлома и высокая – к западу, в зонах развития оперяющих нарушений.

На основе интеграции результатов спектрального анализа (PCA) и структурного дешифрирования сформирована итоговая прогнозная схема (рис. 5). При её построении использовались следующие критерии:

1. Прямой спектральный индикатор: наличие выраженной отрицательной аномалии по PC6 (Al–ОН минералы).
2. Структурный контроль: приуроченность аномалии PC6 к зонам высокой плотности линеаментов, особенно к узлам пересечения субмеридиональных и северо-восточных разломов.
3. Литологический контроль: совпадение с участками высоких значений PC4 (мало-мощный чехол, выходы коренных пород).

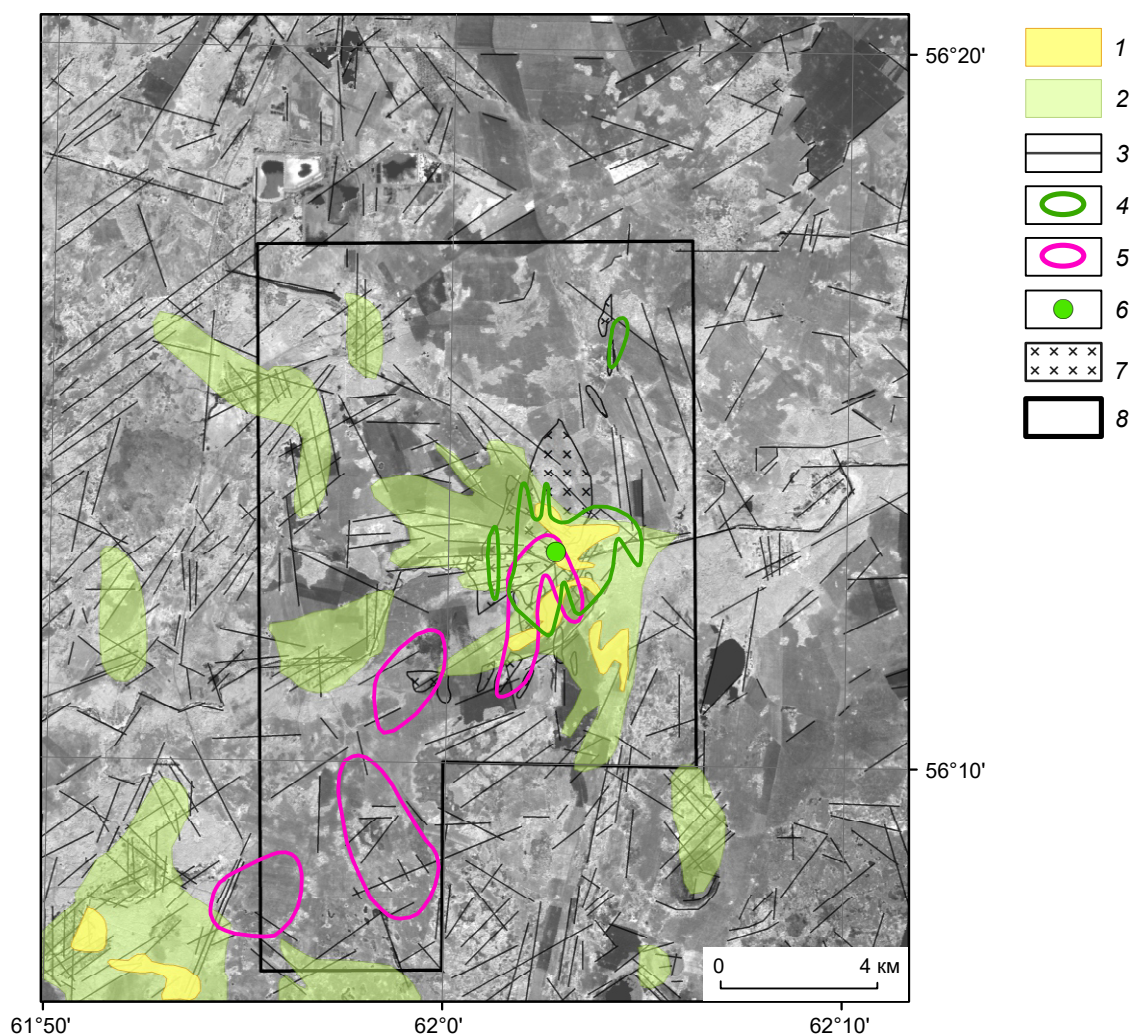


Рис. 5. Прогнозная карта меднопорфирового оруденения района Крайчиковского рудопроявления, синтезированная на основе интеграции спектральных (PC6) и структурных (PC4, плотность линейментов) критериев: в качестве основы использован снимок ASTER (канал B3, разрешение 15 м), что позволяет сопоставить прогнозные участки с ландшафтом; 1 – участки первой очереди (высокоперспективные; характеризуются интенсивной аномалией PC6, приуроченной к узлам пересечения линейментов в зонах максимальной плотности); 2 – участки второй очереди (перспективные; имеют менее выраженную структурную привязку и включают вновь выявленные аномалии к западу); 3 – линейменты; 4 – геохимические аномалии Cu (0,015–0,3 %); 5 – геохимические аномалии Mo (0,001–0,1 %); 6 – Крайчиковское рудопроявление; 7 – крайчиковский гипабиссальный комплекс (потенциально продуктивный); 8 – контур геологической карты (см. рис. 2)

Fig. 5. Forecasting map for porphyry copper mineralization of the Kraichikovo ore occurrence area, synthesized based on integration of the spectral (PC6) and structural (PC4, lineament density) criteria:

The map is superimposed on an ASTER image (band B3, 15 m resolution) which allows one to compare the forecasted areas with the landscape. 1 – first-priority areas (highly prospective; they are characterized by intense PC6 anomalies confined to lineament intersections within zones of maximum density; this category includes the Kraichikovo ore occurrence proper); 2 – second-priority areas (prospective; they characterized by a less pronounced structural control and include newly identified anomalies to the west); 3 – lineaments; 4 – copper geochemical anomalies (Cu 0.015–0.3 %); 5 – molybdenum geochemical anomalies (Mo 0.001–0.1 %); 6 – Kraichikovo ore occurrence; 7 – Kraichikovo hypabyssal complex (potentially productive); 8 – frame of the geological map (Fig. 2)

4. Исключающий критерий: маскировка техногенных объектов (карьер, шламохранилища).

На основании совмещения указанных критериев выделены следующие категории участков:

- участки первой очереди – удовлетворяют всем основным критериям: интенсивная аномалия РС6, приуроченная к узлам пересечения разнонаправленных разломов в зонах максимальной плотности линеаментов, часто с проявлением РС4. В данную категорию попадает основная рудная зона Крайчиковского рудопроявления. Данные участки рекомендуются для постановки первоочередных заверочных работ (бурение, детальные геохимические поиски);
- участки второй очереди – частично удовлетворяют критерию РС6, но имеют слабую или неочевидную структурную привязку (тяготеют к зонам разломов, но не к узлам пересечения) либо пониженные значения РС4. К этой категории отнесены вновь выявленные изометричные аномалии к западу от Крайчиковского рудопроявления. Рекомендуются для детализации геофизическими методами (электроразведка, магниторазведка) на втором этапе работ;
- фоновые участки – территория, не удовлетворяющая указанным критериям.

Сопоставление полученной прогнозной схемы с имеющимися геологическими данными (контуры известных рудопроявлений, геохимические аномалии меди и молибдена) показало высокую степень соответствия. Выделенные участки первой очереди пространственно совпали с известными рудными объектами, что подтверждает корректность разработанной методики.

Таким образом, интеграция спектральных (РС6) и структурных (РС4, плотность линеаментов) критериев позволяет не только оконтуривать известные рудные зоны, но и выявлять новые перспективные участки, скрытые под чехлом рыхлых отложений, с их объективным ранжированием по очередности постановки поисковых работ.

Обсуждение результатов

Полученное совпадение основного прогнозного участка первой очереди с Крайчиковским рудопроявлением, геохимическими ореолами меди и молибдена, а также его приуроченность к зоне развития пород продуктивного крайчиковского комплекса в узле пересечения линеаментов подтверждает корректность разработанной методики. Этот результат позволяет не только констатировать факт эффективности метода РСА для условий полигона, но и провести более глубокий анализ причин, ограничений и места данной методики в общей методологии ГРР.

Ключевой вопрос: почему метод, основанный на статистике второго порядка (ковариации), оказался успешным там, где не работают физически обоснованные спектральные индексы? Ответ лежит в природе мультиспектральных данных в условиях перекрытой территории [5, 26].

• Во-первых, РСА обеспечивает эффективную сепарацию источников дисперсии. Растительность, почвы и коренные породы могут рассматриваться как квазинезависимые источники спектральной изменчивости с точки зрения формы их спектральных кривых, что позволяет РСА эффективно разделять их вклады на спутниковом снимке. Растительность варьирует по плотности и фенологическому состоянию, почвы – по влажности и гранулометрическому составу, коренные породы – по минералогии. РСА, являясь в своей основе методом «слепого» разделения источников (blind source separation), эффективно проецирует эти независимые вариации на ортогональные оси – главные компоненты [18]. РС1 и РС2 захватывают наиболее энергичные, пространственно когерентные вариации (растительность, почвы), оставляя для компонент высших порядков (РС4, РС6) именно те слабые, но структурированные вариации, которые связаны с геологией.

• Во-вторых, метод эффективно работает с мультиколлинеарностью. Высокая корреляция между каналами SWIR (особенно 5–9), продемонстрированная в ковариационной



матрице, является серьёзной проблемой для индексов, так как делает их неустойчивыми к шуму. PCA, напротив, использует эту корреляцию как основу для преобразования, создавая новые ортогональные переменные, в которых информация о минералогических соотношениях (например, глубина поглощения на 2,20 мкм относительно фона) может быть сконцентрирована в одной компоненте [17].

- В-третьих, PCA позволяет выделять «спектральные остатки». Геологически значимый сигнал в условиях мощного чехла можно рассматривать как малую добавку к доминирующему ландшафтному сигналу. PCA последовательно вычитает из данных основные тренды (PC1, PC2...), и в «остатках» (компонентах высокого порядка) как раз и проявляются эти малые, но диагностически важные аномалии. Низкий процент дисперсии PC6 (0,09 %) не является её недостатком, а, наоборот, указывает на то, что она захватила именно этот слабый, но уникальный и некоррелированный с фоном сигнал [6].

Таким образом, интеграция спектральных (PC6) и структурных (PC4, плотность линейных элементов) критериев позволяет не только очертывать известные рудные зоны (как в случае с Крайчиковским рудопроявлением), но и выявлять новые перспективные участки, скрытые под чехлом рыхлых отложений, с их объективным ранжированием по очередности постановки поисковых работ.

Результаты данной работы хорошо согласуются с современными тенденциями в геологическом ДЗЗ для перекрытых территорий. Исследования в лесистых районах Канады, Финноскандии и Сибири также показывают ограниченность прямых индексов и эффективность PCA и его производных (Minimum Noise Fraction, MNF) для выявления скрытого оруденения [13]. Наш результат по PC6 полностью соответствует опыту работ [11], где компоненты, отвечающие за контраст каналов 5 и 6 ASTER, уверенно выделяли зоны серицитизации под тонким чехлом. Выявленная роль PC4 как индикатора участков с маломощным чехлом и зон разрывных нарушений также находит подтверждение в работах по литоструктурному картированию [14, 19].

В последние годы для аналогичных задач активно применяются методы машинного обучения (random forest, support vector machines) для классификации, а также спектральное расщепление (spectral unmixing) для оценки фракционного состава пикселя [25, 27]. Однако эти методы требуют наличия тренировочных выборок (эталонных спектров) высокого качества, полученных в поле или из лабораторных измерений, что на ранних стадиях изучения слабообнажённых территорий часто недоступно. PCA в этом контексте является беспристрастным исследовательским инструментом, который не требует априорных знаний и позволяет обнаруживать неизвестные ранее закономерности, что особенно ценно для слабо изученных перекрытых районов Среднего Урала.

Заключение

1. Проведённые исследования на примере Крайчиковского рудопроявления подтвердили, что для условий Среднего Урала с мощным осадочным чехлом и густой растительностью прямое применение стандартных минералогических индексов на данных ASTER не позволяет эффективно выделять геологически значимые аномалии, так как результирующие карты контролируются ландшафтными и антропогенными факторами.

2. Установлено, что классический анализ главных компонент (PCA) является высокоэффективным инструментом для решения данной проблемы. Метод позволяет статистически отделить слабый спектральный сигнал, связанный с минералогическим составом коренных пород и зон гидротермальных изменений, от доминирующего сигнала растительности и почв. Ключевыми для интерпретации стали компоненты PC4 (высокая положительная нагрузка на канал 4), отражающая литоструктурные особенности и участки с маломощным чехлом, и PC6 (высокая отрицательная нагрузка на канал 6), являющаяся прямым спектральным индикатором Al–OH-содержащих минералов (серицит, иллит), характеризующих околорудные метасоматические изменения.

3. Впервые для района Крайчиковского рудопроявления на основе данных ASTER детализирована сеть разрывных нарушений.



Линеаментный анализ с применением фильтра Собеля и построением розы-диаграммы позволил выделить две основные системы разломов: субмеридиональную (связанную с Алапаевско-Челябинским и Чекуровским разломами) и доминирующую систему оперяющих разломов северо-восточного простирания. Установлено, что зоны пересечения этих систем контролируют положение рудных аномалий.

4. Выявлена контрастная спектральная аномалия по РС6, точно совпадающая с контуром известного Крайчиковского рудопоявления и маркирующая его фланги, а также ряд новых аномалий к западу от него, ранее не известных.

5. На основе интеграции спектральных (РС6, характер метасоматических изменений) и структурных (РС4, карта плотности линеаментов) критериев синтезирована ранжированная карта перспективности, локализуя участки высокого и среднего приоритета для постановки детальных работ. Мето-

дика обладает высокой верифицируемостью и может быть рекомендована для применения на ранних (поисковых) стадиях ГРП на аналогичных перекрытых территориях Среднего Урала и других регионов умеренного пояса.

6. Основными направлениями дальнейших исследований являются: а) полевая верификация выделенных новых перспективных участков комплексом геофизических и геохимических методов; б) апробация методики на других слабо изученных объектах Уральского региона; в) сравнение эффективности классического РСА с более современными методами целевого РСА (ТСР) и машинного обучения при наличии тренировочных данных.

Авторы статьи выражают благодарность за помощь в подготовке материала сотрудникам отделения металлогении и отдела НМС ГРП ФГБУ «ЦНИГРИ» Старостину Ивану Александровичу и Андрееву Антону Вадимовичу.

Список литературы

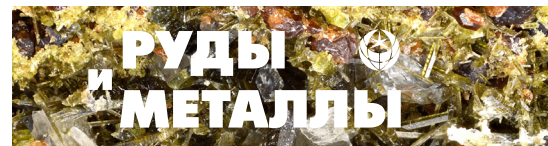
1. Андреев А. В., Гирфанов М. М., Куликов Д. А., Мигачёв И. Ф., Минина О. В., Авилова О. В., Красносельских А. А., Старостин И. А., Черемисин А. А. Рудные районы с медно-порфировым оруденением – перспективная минерально-сырьевая база меди Южного Урала // Отечественная геология. – 2018. – № 4. – С. 3–17.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 492 с.
3. Грабежнев А. И., Белгородский Е. А. Медно-порфировые месторождения Урала: геология, геохимия, геодинамика. – Екатеринбург : ИГТ УрО РАН, 2008. – 274 с.
4. Минина О. В., Мигачёв И. Ф. Медно-порфировые провинции и зоны Южного Урала (прогнозно-металлогеническое районирование) // Отечественная геология. – 2018. – № 4. – С. 26–41.
5. Нафигин И. О., Ишмухаметова В. Т., Устинов С. А., Минаев В. А., Петров В. А. Оценка пригодности территорий для проведения детально-
- го геолого-минералогического картирования по данным спутниковой съемки ASTER // Исследование Земли из космоса. – 2023. – № 2. – С. 61–83. – doi: 10.31857/S0205961423010086.
6. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, Version 2. – Jet Propulsion Laboratory, 2002. – 135 p.
7. Adiri Z., El Harti A., Jellouli A., et al. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 Applications // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 117. – 103332. – doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103332.
8. Ahmed O., El Ghali A., Ben Slimane A., El Hadi H. Structural and mineralogical mapping using multispectral satellite data (Aster, Landsat 8 OLI, and Sentinel 2B) combined with field work in the Western High Atlas, Morocco // Geologos. – 2024. – V. 30, No 2. – P. 119–136. – doi: 10.14746/ologos.2024.30.2.11.
9. Clark R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals // Manual of Remote Sensing. – Wiley, 1999. – V. 3. – P. 3–58.



10. *Coulibaly H. S. P. et al.* Groundwater exploration using extraction of lineaments from SRTM DEM and water flows in Béré region // *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. – 2020. – V. 24 (1). – P. 1–10. – doi: 10.1016/j.ejrs.2020.07.003.
11. *Crósta A. P., De Souza Filho C. R., Azevedo F., Brodie C.* Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. – V. 24 (21). – P. 4233–4240. – doi: 10.1080/0143116031000152291.
12. *Gaffey S. J.* Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35–2.55 μm); calcite, aragonite, and dolomite // *American Mineralogist*. – 1986. – V. 71 (1–2). – P. 151–162.
13. *Harris J. R., Rogge D., Hitchcock R., et al.* Mapping Lithology in Canada's Arctic: Application of hyperspectral data using the minimum noise fraction transformation and matched filtering // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2011. – V. 42 (12). – P. 2173–2193. – doi: 10.1139/e05-064.
14. *Hewson R. D., Cudahy T. J., Mizuhiko S., et al.* Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – V. 99, Iss. 1–2. – P. 159–172. – doi: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
15. *Jellouli A., Chakouri M., Adiri Z. et al.* Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping Using Terra ASTER and Landsat-8 OLI Multispectral Data in the North-Eastern Border of Kerdous Inlier, Western Anti-Atlas Belt, Morocco // *Artificial Satellites*. – 2025. – V. 60 (1). – P. 14–36. – doi: 10.2478/arsa-2025-0002.
16. *Kalinowski A., Oliver S.* ASTER Mineral Index Processing Manual. – Geoscience Australia, 2004. – 39 p.
17. *Loughlin W. P.* Principal component analysis for alteration mapping // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1991. – V. 57. – P. 1163–1169.
18. *Mars J. C., Rowan L. C.* Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms // *Geosphere*. – 2006. – V. 2 (3). – P. 161–186. – doi: 10.1130/GES00044.1.
19. *Mielke C., Boesche N., Rogass C., et al.* Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2 // *Remote Sensing*. – 2014. – V. 6 (8). – P. 6790–6816. – doi: 10.3390/rs6086790.
20. *Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T. J.* Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – V. 101 (4). – P. 127–139. – doi: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
21. *Ninomiya Y., Fu B.* Regional lithological mapping using ASTER-TIR data: case study for the Tibetan Plateau and surrounding areas // *Geosciences*. – 2016. – V. 6 (3). – 39. – doi: 10.3390/geosciences6030039.
22. *Pour A. B., Hashim M.* Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – V. 42. – P. 1309–1323. – doi: 10.1016/J.JSEAES.2011.07.017.
23. *Pour A. B., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // *Ore Geology Reviews*. – 2012. – V. 44. – P. 1–9. – doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
24. *Richards J. A.* Remote Sensing Digital Image Analysis. – Springer, 2022. – 567 p. – doi: 10.1007/978-3-030-82327-6.
25. *Rowan L. C., Mars J. C.* Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – V. 84 (3). – P. 350–366. – doi: 10.1016/S0034-4257(02)00127-X.
26. *Sabins F. F.* Remote sensing for mineral exploration // *Ore Geology Reviews*. – 1999. – V. 14, Iss. 3–4. – P. 157–183.
27. *Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., et al.* Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review // *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. – 2012. – V. 14. – P. 112–128. – doi: 10.1016/j.jag.2011.08.002.

References

1. Andreev A. V., Girfanov M. M., Kulikov D. A., et al. Rudnye raiony s medno-porfirovym orudneniem – perspektivnaya mineral'no-syr'evaya baza medi Yuzhnogo Urala [Ore regions with porphyry copper mineralization – a promising mineral resource base for copper in the Southern Urals], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2018, No 4, pp. 3–17. (In Russ.)
2. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Ural'skaya. List O-41 – Ekaterinburg. Ob'yasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural Series. Sheet O-41 – Yekaterinburg. Explanatory Note], St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI Publ., 2011, 492 p.
3. Grabezhev A. I., Belgorodskii E. A. Medno-porfirovye mestorozhdeniya Urala: geologiya, geokhimiya, geodinamika [Porphyry copper deposits of the Urals: geology, geochemistry, geodynamics], Ekaterinburg, IGG UrO RAN [Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of UB of RAS], 2008, 274 p.
4. Minina O. V., Migachev I. F. Medno-porfirovye provintsii i zony Yuzhnogo Urala (prognoznno-metallogenicheskoe raionirovanie) [Copper-porphyry provinces and zones of the Southern Urals (predictive metallogenic zoning)], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2018, No 4, pp. 26–41. (In Russ.)
5. Nafigin I. O., Ishmukhametova V. T., Ustinov S. A., et al. Otsenka prigodnosti territorii dlya provedeniya detal'nogo geologo-mineralogicheskogo kartirovaniya po dannym sputnikovoi s'emki ASTER [Assessment of the suitability of territories for detailed geological and mineralogical mapping based on ASTER satellite imagery data], *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Research from Space], 2023, No 2, pp. 61–83. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0205961423010086.
6. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, Version 2, Jet Propulsion Laboratory, 2002, 135 p.
7. Adiri Z., El Harti A., Jellouli A., et al. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 Applications, *Ore Geology Reviews*, 2020, Vol. 117, 103332, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103332.
8. Ahmed O., El Ghali A., Ben Slimane A., El Hadi H. Structural and mineralogical mapping using multispectral satellite data (Aster, Landsat 8 OLI, and Sentinel 2B) combined with field work in the Western High Atlas, Morocco, *Geologos*, 2024, Vol. 30, No 2, pp. 119–136, DOI: 10.14746/logos.2024.30.2.11.
9. Clark R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, Manual of Remote Sensing, Wiley, 1999, Vol. 3, pp. 3–58.
10. Coulibaly H. S. P. et al. Groundwater exploration using extraction of lineaments from SRTM DEM and water flows in Béré region, *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2020, Vol. 24(1), pp. 1–10, DOI: 10.1016/j.ejrs.2020.07.003.
11. Crósta A. P., De Souza Filho C. R., Azevedo F., Brodie C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24 (21), pp. 4233–4240, DOI: 10.1080/0143116031000152291.
12. Gaffey S. J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35–2.55 μm); calcite, aragonite, and dolomite, *American Mineralogist*, 1986, Vol. 71 (1–2), pp. 151–162.
13. Harris J. R., Rogge D., Hitchcock R., et al. Mapping Lithology in Canada's Arctic: Application of hyperspectral data using the minimum noise fraction transformation and matched filtering, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2011, Vol. 42 (12), pp. 2173–2193, DOI: 10.1139/e05-064.
14. Hewson R. D., Cudahy T. J., Mizuhiko S., et al. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 99, Issues 1–2, pp. 159–172, DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
15. Jellouli A., Chakouri M., Adiri Z., et al. Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping Using Terra ASTER and Landsat-8 OLI Multispectral Data in the North-Eastern Border of Kerdous Inlier, Western Anti-Atlas Belt, Morocco, *Artificial Satellites*, 2025, Vol. 60 (1), pp. 14–36, DOI: 10.2478/arsa-2025-0002.
16. Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual, Geoscience Australia, 2004, 39 p.



17. Loughlin W. P. Principal component analysis for alteration mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, Vol. 57, pp. 1163–1169.
18. Mars J. C., Rowan L. C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms, *Geosphere*, 2006, Vol. 2 (3), pp. 161–186, DOI: 10.1130/GES00044.1.
19. Mielke C., Boesche N., Rogass C., et al. Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6 (8), pp. 6790–6816, DOI: 10.3390/rs6086790.
20. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T. J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multi-spectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 101 (4), pp. 127–139, DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
21. Ninomiya Y., Fu B. Regional lithological mapping using ASTER-TIR data: case study for the Tibetan Plateau and surrounding areas, *Geosciences*, 2016, Vol. 6 (3), 39, DOI: 10.3390/geosciences6030039.
22. Pour A. B., Hashim M. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, Vol. 42, pp. 1309–1323, DOI: 10.1016/J.JSEAES.2011.07.017.
23. Pour A. B., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits, *Ore Geology Reviews*, 2012, Vol. 44, pp. 1–9, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
24. Richards J. A. Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer, 2022, 567 p., DOI: 10.1007/978-3-030-82327-6.
25. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 84 (3), pp. 350–366, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00127-X.
26. Sabins F. F. Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews*, 1999, Vol. 14, Issue 3–4, pp. 157–183.
27. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., et al. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, Vol. 14, pp. 112–128, DOI: 10.1016/j.jag.2011.08.002.

Столяров Игорь Олегович (stolyarov@tsnigri.ru)
младший научный сотрудник ^{1,2}

Гирфанов Михаил Миргалимович
кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом ¹

¹ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, г. Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

Igor Olegovich Stolyarov (stolyarov@tsnigri.ru)
Junior Researcher ^{1,2}

Mikhail Mirgalimovich Girfanov
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department ¹

¹ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBI TsNIGRI), Moscow, Russia

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia