

УДК 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088
Шифр специальности ВАК: 1.6.10
Научная статья

Структурно-метасоматическая модель медно-порфирового рудного поля Актогай по материалам дистанционных съемок (северо-восточное Прибалхашье)

Ф.Е. Сейров✉, Ю.С. Ананьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉fes2@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время основным источником меди и некоторых благородных металлов являются месторождения медно-порфирового типа. Согласно современным представлениям, такие месторождения формировались в надсубдукционных условиях в пределах базальтоидных и андезитоидных вулканоплутонических поясов. Подобные геодинамические обстановки установлены и в Центральной Азии. Актогайское рудное поле, расположено в пределах Жонгаро-Балхашского вулканоплутонического пояса (ВПП) позднепалеозойского возраста. Месторождения рудного поля были разведаны в 70–80 гг. прошлого века, а их разработка началась только несколько лет назад. Практически не нарушенные ландшафты (в отношении съемок ASTER), высокая степень обнаженности и засушливые климатические условия позволяют сформировать на основе Актогайского рудного поля эталонную структурно-метасоматическую модель медно-порфировых систем по материалам дистанционных космических съемок. **Цель.** Выявление рудоконтролирующих структур и околорудных метасоматитов медно-порфировых месторождений рудного поля Актогай. **Методы.** Исходными материалами послужили данные космических съемок ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и Landsat-8. Для выявления структурных закономерностей также использована цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Для выявления околорудных метасоматитов использованы методы космической инфракрасной спектроскопии – искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент, которыми выявлялись характеристические полосы поглощения минералов гидротермалитов. **Результаты.** В структурном плане околорудные метасоматиты и оруденение контролируются зонами сопряжения продольных и поперечных разломов по отношению к простиранию Баканас-Алакольского сегмента Жонгаро-Балхашского вулканоплутонического пояса. По результатам обработки и дешифрирования выявлены зонально расположенные пропициты, аргиллизиты и филлизиты. Показана пространственная связь выявленных филлизитов и аргиллизитов с рудными штокверками месторождений рудного поля.

Ключевые слова: Актогай, Жонгаро-Балхашский пояс, медно-порфировые месторождения, дистанционные методы, метасоматическая зональность, Aster, Landsat-8

Для цитирования: Сейров Ф.Е., Ананьев Ю.С. Структурно-метасоматическая модель медно-порфирового рудного поля Актогай по материалам дистанционных съемок (северо-восточное Прибалхашье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088

UDC 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088
Scientific paper

Structural-metasomatic model of the Aktogai porphyry copper ore field based on remote sensing (north-eastern Balkhash region)

F.E. Seirov✉, Yu.S. Ananyev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉fes2@tpu.ru

Abstract. Relevance. Currently, the main source of copper and some precious metals are porphyry copper deposits. According to modern concepts, such deposits were formed in suprasubduction conditions within basaltoid and andesitoid volcano-plutonic belts. Similar geodynamic settings have been established in Central Asia. The Aktogai ore field is located within the Zhongaro-Balkhash volcano-plutonic belt of the Late Paleozoic age, within which other porphyry copper objects are localized. The ore field deposits were explored in the 70–80s of the last century, and their development began only a few years ago. Virtually undisturbed landscapes (in relation to ASTER surveys), a high degree of outcrop and arid climatic conditions make it possible to form a reference exploration model of porphyry copper systems based on remote sensing data from space on the basis of the Aktogai ore field. **Aim.** Identification of ore-controlling structures and wallrock metasomatites of porphyry copper deposits of the Aktogai ore field. **Methods.** The source materials were the data of space surveys ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) and Landsat-8. To identify structural patterns, the digital elevation model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) was also used. To identify wallrock metasomatites, the authors used the methods of space infrared spectroscopy – artificial colors, mineral indices and main components, which revealed characteristic absorption bands. **Results.** Structurally, wallrock metasomatites and mineralization are controlled by the conjugation zones of longitudinal and transverse faults in relation to the strike of the Bakanas-Alakol segment of the Zhongaro-Balkhash volcano-plutonic belt. Based on the results of processing and decoding, the authors identified zonally located propylites, argillizites and phyllisites. The paper demonstrates the spatial relationship of the identified phyllisites and argillizites with ore stockworks of the ore field deposits.

Keywords: Aktogai, Zhongaro-Balkhash belt, porphyry copper deposits, remote sensing methods, metasomatic zoning, Aster, Landsat-8

For citation: Seirov F.E., Ananyev Yu.S. Structural-metasomatic model of the Aktogai porphyry copper ore field based on remote sensing (north-eastern Balkhash region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088

Введение

Месторождения медно-порфирового типа представляют собой центральные части гидротермально-метасоматических систем. Главными отличительными признаками от других типов является их связь с порфировыми интрузивами гранитоидного состава и специфическая метасоматическая зональность [1, 2]. Рудно-магматические системы (РМС) порфировых месторождений формируются в надсубдукционных обстановках в пределах базальтоидных и андезитовидных вулканоплутонических поясов (ВПП). Большая часть известных на данный момент медно-порфировых месторождений располагается в ВПП Тихоокеанского побережья Северной и Южной Америки, Восточной Азии. Также в литературе подробно описаны продуктивные ВПП Центральной Азии, Ближнего Востока и Балкан [3–6]. В настоящее время больше половины мировых запасов меди приходится на месторождения медно-порфирового типа. Помимо меди, из месторождений данного типа также нередко извлекаются редкоземельные элементы, золото, серебро, молибден и некоторые другие [7]. В России как наиболее перспективные на обнаружение медно-порфировых систем оцениваются территории ВПП Южного Урала, Алтая и в большей степени Дальнего Востока России [1]. Одним из ближайших продуктивных ВПП является позднепалеозойский Прибалхашско-Илийский пояс, в пределах которого расположены месторождения Акчатау, Коунрад, Актогай, Айдарлы, Кызылкия.

В целом способы выявления потенциально рудоносных площадей, являющихся перспективными

для обнаружения медно-порфирового оруденения, в общих чертах изучены [8–17] на примере рудных районов Невады, Тихоокеанского побережья Южной Америки, вулканоплутонических поясов Ирана. При этом, как правило, отмечается, что наиболее подходящими условиями для применения дистанционных методов являются засушливый пустынный и полупустынный климат с небольшим количеством растительности и слабо расчленённым рельефом. В связи с этим изучение объектов, расположенных в Прибалхашско-Илийском ВПП, может быть перспективным с методической точки зрения. С одной стороны, эти объекты расположены в условиях, которые могут быть оценены как крайне благоприятные для применения данных дистанционного зондирования (ДЗ), и обобщённая модель, полученная с их использованием, будет наиболее полной. С другой стороны, географическая близость, схожесть геотектонических обстановок с продуктивными ВПП России позволяет оценивать полученную методику дешифрирования спектрально-зональных снимков как перспективную для прогнозирования РМС медно-порфирового типа в Алтае-Саянской складчатой области.

Краткая геологическая характеристика Прибалхашско-Илийского вулканоплутонического пояса и Актогайского рудного поля

Актогайское рудное поле расположено в Баканас-Алакольском сегменте фронтальной области Прибалхашско-Илийского окраинно-континентального ВПП [18]. В развитии пояса выделяют два этапа: первый –

средне-позднекаменноугольный, второй – пермский. В ходе первого этапа сформировались вулканогенные толщи андезит-дацит-риолитового состава, которые в более позднем этапе перекрываются вулканитами дацит-риолитового состава и локально прорываются интрузивными образованиями преимущественно гранитного и гранодиоритового состава [19].

В пределах ВПП стратифицированные комплексы представлены преимущественно позднепалеозойскими осадочными вулканогенными толщами кислого и среднего составов. В западной части отмечается значительное количество силурийских терригенных образований, представленных по большей части песчаниками и алевролитами. В непосредственной близости от Актогайского рудного поля преобладают позднепалеозойские вулканогенно-осадочные образования смешанного, пре-

имущественно основного состава. Интрузивные образования ВПП в основном представлены изометричными либо вытянутыми в направлении простирания ВПП телами гранитов и гранодиоритов позднепалеозойского возраста. В пределах пояса разрывная тектоника представлена протяжёнными разломами преимущественно восточного северо-западного простирания и секущими их более мелкими разломами, также отмечается ряд синклинориев и антиклинориев ориентированных по простиранию пояса [20, 21].

Актогайское рудное поле расположено в юго-восточной части Баканосского синклинория. В рудное поле объединены месторождения Актогай в центральной части поля, Айдарлы в северо-западной и Кызылкия в северо-восточной, а также ряд мелких рудопроявлений (рис. 1).

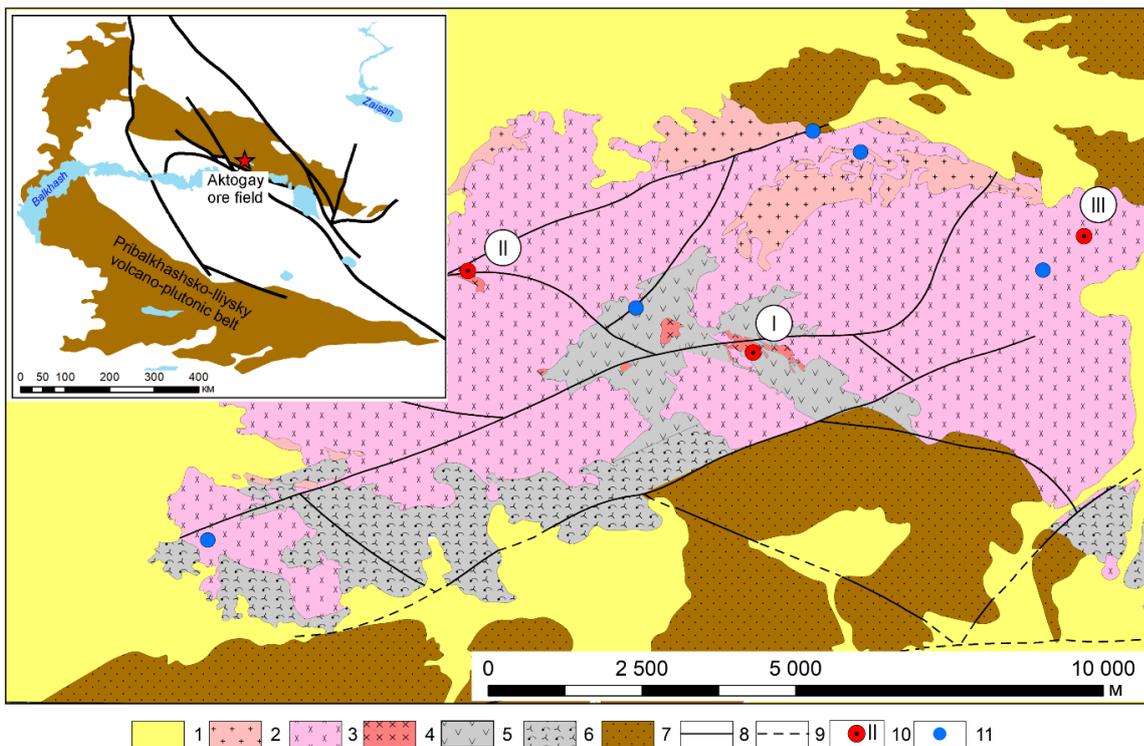


Рис. 1. Схема геологического строения рудного поля Актогай по [22] с изменениями и дополнениями от авторов: 1 – четвертичные отложения; 2 – граниты мелко- и среднезернистые позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 3 – диориты и гранодиориты позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 4 – дайки гранодиорит-порфиров позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 5 – нерасчленённые вулканогенные породы преимущественно андезитового и андезидацитного состава кергетаской свиты (C₂₋₃); 6 – ингимбриты и туфы сложного состава кергетаской свиты (C₂₋₃); 7 – песчаники, алевролиты, а также вулканогенно-осадочные породы колдарской свиты (C₃-P₁); 8 – разрывные нарушения, выходящие на поверхность; 9 – разрывные нарушения под четвертичными образованиями; 10 – известные месторождения: I – Актогай, II – Айдарлы, III – Кызылкия; 11 – рудопроявления

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Aktogay ore field based on [22] with modifications and additions from the authors: 1 – Quaternary deposits; 2 – fine- and medium-grained granites of the Late Carboniferous intrusive complex; 3 – diorites and granodiorites of the Late Carboniferous intrusive complex; 4 – granodiorite-porphyr dikes of the Late Carboniferous intrusive complex; 5 – undifferentiated volcanic rocks of mainly andesite and andesitic composition of the Keregetas suite (C₂₋₃); 6 – ingimbrites and tuffs of complex composition of the Keregetas suite (C₂₋₃); 7 – sandstones, siltstones, and volcanogenic-sedimentary rocks of the Koldar suite (C₃-P₁); 8 – faults outcropping on the surface; 9 – faults beneath Quaternary formations; 10 – deposits: I – Aktogay, II – Aidarly, III – Kyzylkia; 11 – ore occurrences

Границами поля служат экзоконтакты Колдарского интрузивного массива с образованиями среднего и позднего карбона, представляющими собой рудовмещающую вулканогенную часть комплекса и относящуюся к андезит-дацит-молассовой формации, в состав которой входят преимущественно андезиты и андезибазальты, их субвулканические и жерловые тела, туфы и туффиты этого же состава, а также субвулканические тела дацитовых и риолит-дацитовых порфиров. Обнаженная часть массива фиксирует присводовую часть Колдарской горст-антиклинали, крылья которой сложены вулканогенно-осадочными и вулканогенными образованиями позднего карбона и ранней-средней перми. Колдарский массив имеет форму лакколита, в составе которого выделяют три фазы: первая – габбро-диориты, габбро-долериты, диориты, гранодиориты; вторая – граниты биотитовые; третья – граниты порфиroidные, гранит-порфиры. Строение участка во многом обусловлено расположением зоны разрывных нарушений, главными разломами являются Главный Колдарский и Южный Колдарский разломы северо-восточного направления, в непосредственной близости от центра участка они сопрягаются с Актогайским разломом [22].

На месторождении выделены полнопроявленные метасоматиты как щелочной, так и кислотной стадии [22, 23]. Фронтальная зона объединяет области развития биотит-хлорит-эпидотовых пропилов. Интенсивность проявления метасоматических изменений фронтальной зоны наибольшая в диоритах и роговиках и меньшая в гранодиоритах. Рудная минерализация пропилов представлена преимущественно редкими магнетитом и пиритом. Метасоматиты этой зоны занимают обширные площади по периферии рудных зон и редко входят в контуры промышленно значимой минерализации. Промежуточная зона представлена филлизитовыми и аргиллизитовыми изменениями кислотной стадии гидротермального процесса и проявлена локально по периферии рудных зон и частично входящих в её контур. Рудная минерализация представлена в основном халькопиритом, в меньшей степени магнетитом. В тыловых зонах известных проявлений отмечается окварцевание и калишпатизация как по породной массе, так и в виде кварц-микроклиновых прожилков, количество которых увеличивается в направлении от фронтальных зон к тыловым. Среди рудных минералов тыловой зоны преобладает борнит, реже встречаются халькозин и халькопирит.

Исходные материалы и их предварительная обработка

В работе используются материалы съёмки Landsat-8, ASTER, SRTM, а также опубликованные геологические материалы по рудному полю. Мате-

риалы дистанционных съёмок получены с сайта геологического общества США [24].

Спектрональные снимки ASTER содержат каналы в трёх спектральных диапазонах – видимый и ближний инфракрасный диапазон (visible and near infrared radiation – VNIR) – 3 канала с пространственным разрешением 15 м, коротковолновой ИК (shortwave infrared radiation – SWIR) – 6 каналов с пространственным разрешением 30 м, и тепловой ИК (thermal infrared radiation – TIR) – 5 каналов с разрешением 90 м. В работе использован снимок AST_L1T_00308142004054309_20150505155841_16754. В материалах Landsat-8 содержатся диапазоны VNIR – 5 каналов с разрешением 30 м, SWIR – 3 канала с разрешением 30 м, TIR – 2 канала с разрешением 100 м и панхроматическая полоса в видимом диапазоне с разрешением 15 м. Обработывался и анализировался снимок LC08_L2SP_149027_20130822_20200912_02_T1.

Первичная обработка снимков ASTER производилась с использованием радиометрической калибровки снимков [25–27] и атмосферной коррекции (модель FLAASH) [25]. Подготовка данных Landsat заключалась в извлечении моноканальных растров из архива и создании мультиспектрального растра. Данные SRTM обрабатывались с использованием отмывки рельефа и направленной дифференциации.

Методы работы со снимками

Для выявления на территории Актогайского рудного поля разрывных нарушений использовался весь набор растровых данных – ASTER, Landsat, SRTM. Разрывные нарушения проявлены в материалах Landsat-8 в виде линейных зон, по обе стороны которых наблюдается смена текстуры изображения, вдоль них происходит смещение тел стратиграфических подразделений. В цифровых моделях рельефа и в результатах их дифференцирования разрывным нарушениям, как правило, соответствуют линейные градиентные зоны, которые подчёркиваются крутыми склонами, а также нарушениями сплошности и смещения элементов рельефа – бортов долин, хребтов и прочего.

Выявление метасоматически изменённых пород в материалах дистанционного зондирования основывается на особенностях различных минералов к отражению и поглощению в различных частях спектра электромагнитного излучения. Наличие в спектрах ASTER характеристических полос поглощения групп Fe-Mg-OH, Al-OH, CO₃⁻ и SiO₂ позволяет выявлять некоторые минералы метасоматитов – эпидот, хлорит, кальцит, мусковит, серицит, каолинит, кварц и другие.

На рис. 2 показаны спектральные кривые основных минералов филлизитов, аргиллизитов и пропилов [26].

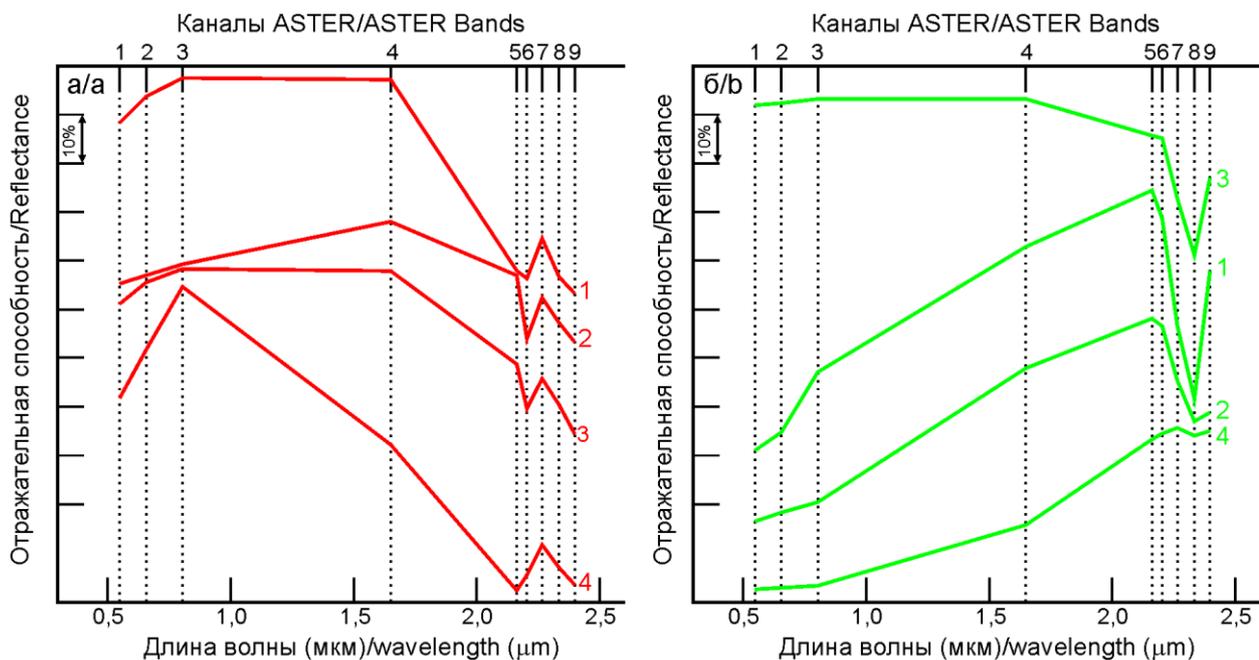


Рис. 2. а) спектры некоторых минералов, характерных для филлизитов и аргиллизитов во VNIR-SWIR диапазонах ASTER; 1 – каолинит, 2 – мусковит (серицит), 3 – монтмориллонит, 4 – алунит; б) спектры некоторых минералов, характерных для пропилитов во VNIR-SWIR диапазонах ASTER; 1 – эпидот, 2 – хлорит, 3 – кальцит, 4 – биотит

Fig. 2. a) spectra of some minerals characteristic of the phyllisite and argillizite in the VNIR-SWIR ranges of ASTER; 1 – kaolinite, 2 – muscovite (sericite), 3 – montmorillonite, 4 – alunite; b) spectra of some minerals characteristic of the propylite in the VNIR-SWIR ranges of ASTER; 1 – epidote, 2 – chlorite, 3 – calcite, 4 – biotite

Для выявления метасоматически измененных горных пород использовались методы искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент для SWIR диапазона снимков ASTER.

На начальных этапах работы применялся метод искусственных цветов. Для выявления характерных минералов метасоматитов использован композит 4, 6, 8 каналов в палитре RGB [27]. Этот композит позволяет определять области, содержащие глинистые минералы, серицит и мусковит по розовой и красной окраске пикселей ввиду высокой отражательной способности этих минералов в 4 канале и низкой в 6 и 8 (рис. 2), а также основные минералы пропилитов (эпидот и хлорит) по зеленой окраске в связи с их высоким отражением в 6 спектральном диапазоне и низким в 4 и 8 (рис. 3).

Метод спектральных индексов основан на подчеркивании характеристических полос поглощения минералов путем простейших алгебраических операций над значениями спектральных яркостей пикселей в различных спектральных диапазонах. В табл. 1 приведены некоторые минеральные индексы по материалам [28–31], которые были использованы при работе со спектральнозональными снимками Aster.

Метод главных компонент служит для преобразования снимков с целью устранения корреляцион-

ной зависимости между исходными многомерными данными при одновременном сжатии большей части дисперсии полного изображения с последующим анализом матрицы собственных векторов [15] и геометризацией полученных результатов по площади рудного поля.

Аргиллизитовым и филлизитовым изменениям будет соответствовать компонента, у которой в матрице собственных векторов прослеживаются пониженные значения в 5 и 6 канале ASTER при высоких значениях в 4 и 7 (рис. 2, а), пропилитам будет отвечать компонента с наименьшим собственным значением 8 канала, при высоких значениях для 7 и 9 каналов (рис. 2, б).

Геологическая интерпретация комплекса полученных материалов сводилась к разбраковке и обобщению получаемых в ходе применения методов результатов при сопоставлении их с имеющимися геологическими данными.

Полученные результаты

Структурный анализ. Разрывные нарушения можно эффективно выявить при совместном использовании данных дистанционных съемок и цифровой модели рельефа (ЦМР). Разрывные нарушения на снимках проявляются в рельефе по прямым и косвенным признакам.

Таблица 1. Минеральные индексы, использованные для выявления основных разновидностей метасоматитов по материалам ASTER

Table 1. Mineral indices used to identify the main varieties of metasomatites based on ASTER materials

Индекс Index	Формула вычисления Calculation formula	Интерпретация/Interpretation
Филлизиты (кварц, серицит)/Phyllic (quartz, sericite)		
MI ³	$(\text{band}12 * \text{band}14 * \text{band}14 * \text{band}14) / (\text{band}13 * \text{band}13 * \text{band}1 * \text{band}13)$	Участки окварцевания, основность горных пород Silicification areas, mafic rocks
Fillit	$(\text{band}5 + \text{band}7) / \text{band}6$	Филлитовый индекс. Слюдистые минералы (преимущественно серицит) Phyllite index. Mica minerals (mainly sericite)
Аргиллизиты (каолинит, монтмориллонит, иллит, смектит, алунит, кварц, серицит) Argillic (kaolinite, montmorillonite, illite, smectite, alunite, quartz, sericite)		
KLI	$(\text{band}4 / \text{band}5) * (\text{band}8 / \text{band}6)$	Каолинит/Kaolinite
OHI	$(\text{band}7 / \text{band}6) * (\text{band}4 / \text{band}6)$	ОН-содержащие минералы (гидрослоды) OH-bearing minerals
Пропилиты (эпидот, хлорит, амфибол, кальцит)/Propylitic (epidote, chlorite, amphibole, calcite)		
Amf±MgOH	$(\text{band}6 + \text{band}9) / \text{band}8$	Амфибол, MgOH-содержащие минералы (эпидот, хлорит) Amphibole, MgOH-bearing minerals (epidote, chlorite)
RBD8	$(\text{band}7 + \text{band}9) / \text{band}8$	Эпидот±хлорит±карбонат Epidote±chlorite±carbonate
MgOH	$\text{band}7 / \text{band}8$	MgOH-содержащие минералы (эпидот, хлорит) MgOH-bearing minerals (epidote, chlorite)
Ep±Chl±Amf	$(\text{band}6 + \text{band}9) / (\text{band}7 + \text{band}8)$	Эпидот±хлорит±амфибол Epidote±chlorite±amphibole
CLI	$(\text{band}6 / \text{band}8) * (\text{band}9 / \text{band}8)$	Кальцит/Calcite

К прямым признакам можно отнести смещения, вдоль которых происходят нарушения сплошности выявляемых в ходе работы линеаментов, отвечающих геологическим объектам – это могут быть как границы породных комплексов, так и элементы внутреннего строения, например, слоистость в осадочных породах. Косвенные признаки разрывных нарушений – им могут соответствовать линеаменты, отвечающие протяженным узким зонам понижений или смещений в рельефе. Как правило, линеаменты, потенциально отвечающие разрывным нарушениям выявляются по смене текстуры растрового изображения по обе стороны разрывного нарушения.

В результате анализа цифровой модели рельефа в комплексе со спектральными данными было установлено положение разломов.

По ориентировке разрывных нарушений можно выделить три группы:

- 1) разломы запад-северо-западного и северо-западного простирания, продольные по отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП, самые протяженные из представленных. Прослеживаются на десятки и первые сотни км. В пределах рудного поля отдельные сегменты этих разломов, ограниченные ортогональными нарушениями, прослеживаются в районах штокверков месторождений Актогай, Айдарлы, Кызылкия;
- 2) разломы северо-восточного простирания прослеживаются по всей территории Актогайского рудного поля. По отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП имеют поперечное простирание.

Их протяженность может достигать первых десятков км. Рудные штокверки месторождений Актогай, Айдарлы и Кызылкия сопряжены с этими разрывами;

- 3) разломы северо-северо-западного и субмеридионального простирания, диагональные по отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП. По распространённости в пределах поля являются самыми редкими и занимают преимущественно периферийные части поля. Единичные разломы этого типа прослеживаются на удалении около 1 км от месторождения Айдарлы.

Как видно из полученной структурной схемы (рис. 3), медно-порфировые месторождения Актогайского рудного поля располагаются в зонах сопряжения продольных и поперечных разломов к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП.

Метасоматиты, выявляемые в материалах дистанционных съёмки околорудные метасоматически изменённые породы Актогайского рудного поля, представлены тремя разновидностями – филлизиты, аргиллизиты и пропилиты.

В искусственных цветах композит из полос 4, 6, 8 SWIR диапазона ASTER (рис. 3) в палитре RGB позволяет выявлять глинистые минералы, серицит и мусковит по оттенкам красного и розового цвета, поскольку эти минералы имеют наибольшее отражение в 4 канале и сравнительно невысокое в 6 и 8. Пропилиты в этом композите будут иметь зеленоватые оттенки, поскольку минералы этих метасоматитов имеют высокое отражение в 6 и существенно более низкое в 4 и 8.

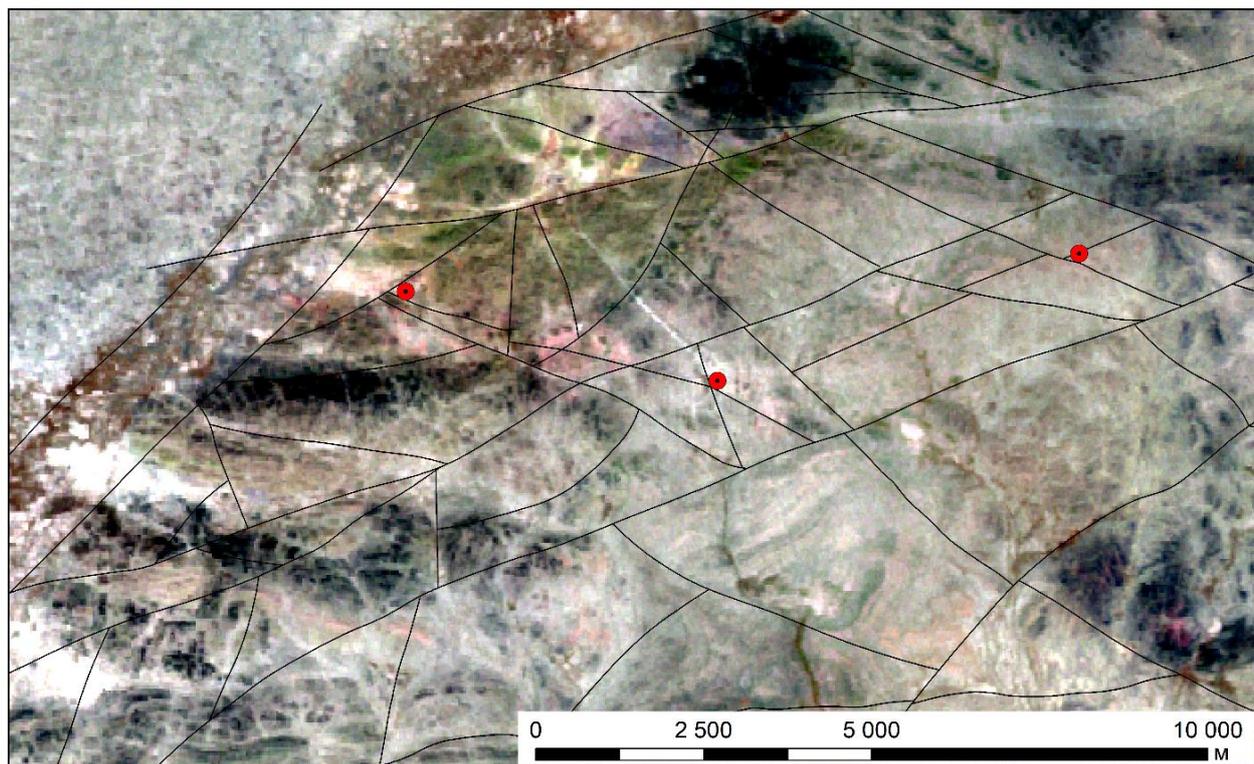


Рис. 3. Положение разломов Актогайского рудного поля на подложке информативного композита 4, 6, 8 каналов ASTER. Черные линии – разрывные нарушения, выделенные по результатам дешифрирования

Fig. 3. Position of the faults of the Aktogay ore field on the base of the informative composite of 4, 6, 8 ASTER channels. Black lines are faults identified based on the results of interpretation

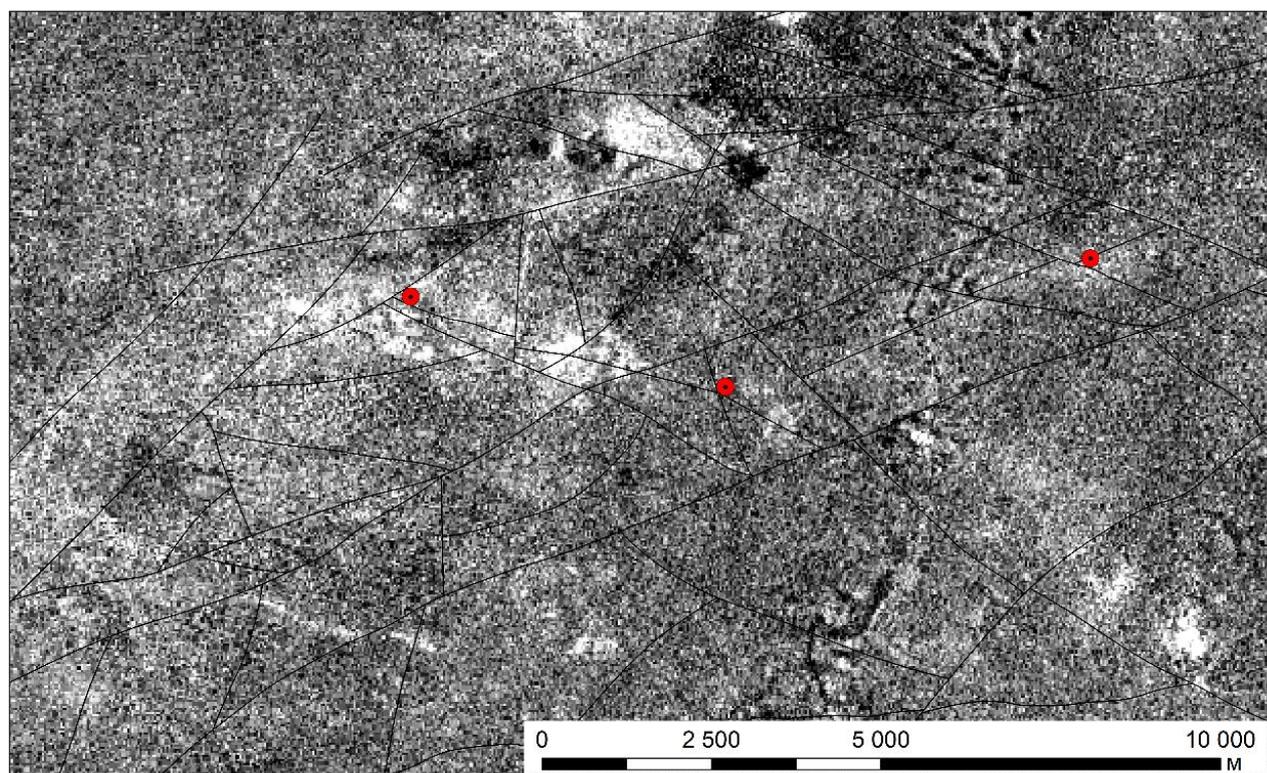


Рис. 4. Индекс ОНІ. Белые пиксели соответствуют породам, обогащенным ОН-содержащими минералами

Fig. 4. OHI index. White pixels correspond to rocks enriched in OH-containing minerals

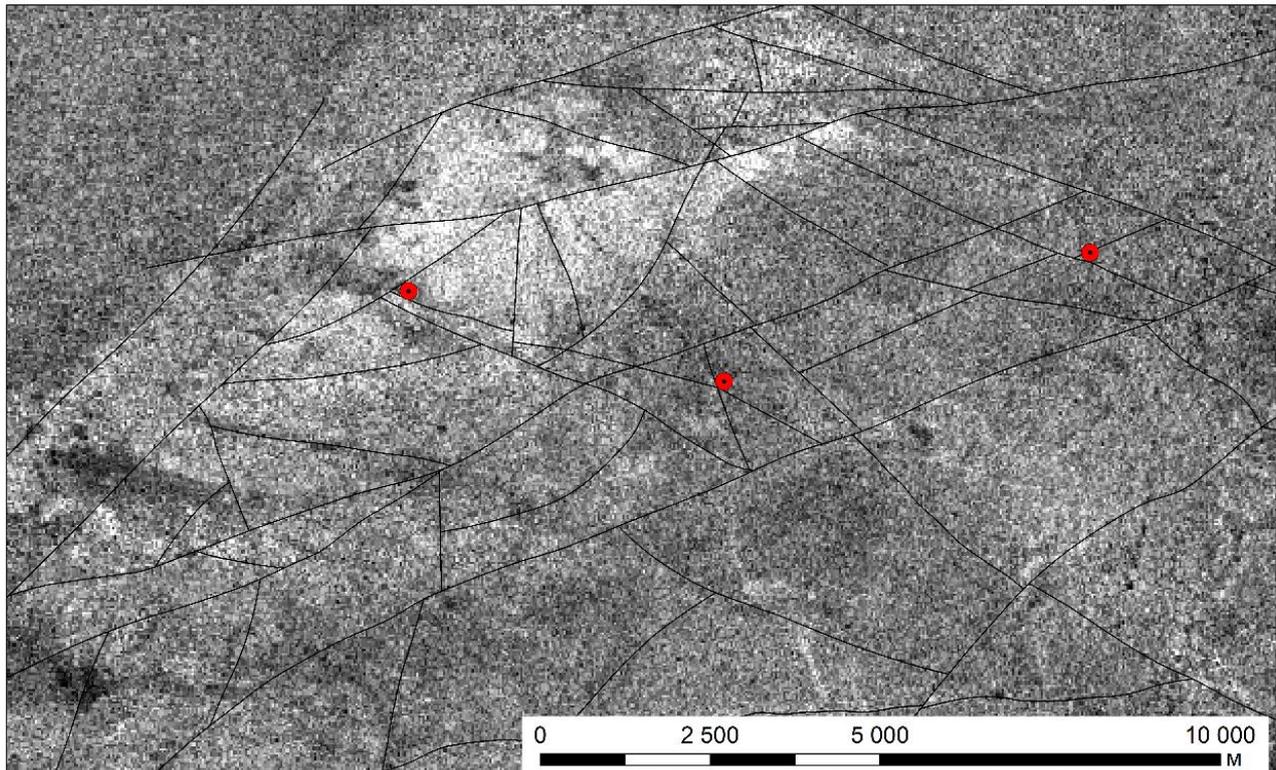


Рис. 5. Индекс RBD8. Белые пиксели соответствуют породам, обогащенным эпидотом, хлоритом, карбонатом
Fig. 5. RBD8 index. White pixels correspond to rocks enriched in epidote, chlorite, carbonate

Как видно из рис. 4, розоватые области располагаются в зонах влияния разрывных нарушений северо-западной ориентировки, особенно на участке между месторождениями Актогай и Айдарлы, а также вблизи месторождения Кызылкия. На севере рудного поля наблюдается область в зеленоватых тонах восточнее месторождения Айдарлы размерами более 4–5 км, а также ряд более мелких зеленоватых проявлений ближе к центральной части поля вблизи месторождения Актогай.

В минеральных индексах положение кварцсерицитовых метасоматитов (филлизитов) фиксируется значимыми величинами филлитового индекса, индекса ОН-содержащих минералов (рис. 4), индекса MI^3 . Положение аргиллизитов фиксируется значимыми величинами каолинитового и ОН-содержащих минералов индексов. Пропилиты про-

являются в значимых величинах индексов амфибола±MgOH, эпидот±хлорит±амфибола, эпидот±хлорит±карбонат (рис. 5), MgOH-содержащих минералов, индекса кальцита.

Метод главных компонент позволяет определить положение филлизитовых и пропилитовых метасоматитов. Матрица собственных векторов для главных компонент, рассчитанных по SWIR диапазону снимка ASTER, приведена в табл. 2.

Как видно из матрицы собственных векторов, третья компонента отвечает наименьшему отражению в 5 канале при близких высоких значениях в 7 и 8 каналах. Четвёртая компонента фиксирует наименьшее отражение в 6 канале и понижение в 8 при явно высоком значении в 7 канале. Шестая компонента имеет наибольшее отражение в 7 и 9 каналах и минимальное значение в 8 канале.

Таблица 2. Матрица собственных векторов

Table 2. Matrix of eigenvectors

Каналы Bands	Главные компоненты/Principal components					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
4	0,87506	0,48304	0,01991	0,00454	0,02081	0,00941
5	0,26806	-0,47057	-0,73530	0,29865	0,27553	0,03062
6	0,26615	-0,45040	-0,07901	-0,70211	-0,46803	-0,08973
7	0,23435	-0,43694	0,44969	0,54610	-0,40008	0,30602
8	0,16740	-0,32440	0,41083	0,04044	0,41604	-0,72335
9	0,09290	-0,21501	0,28581	0,34345	0,60947	0,61159

Интерпретировать результат можно следующим образом: третья компонента отвечает преимущественно глинистым минералам и выявляет области распространения современных отложений и русловой аллювий. Четвёртая компонента в значительной степени соответствует породным комплексам и отвечает породам, содержащим серицит.

Эти образования на рассматриваемой территории представлены филлизитами по диоритам, гранодиоритам и более кислыми разностями, проявленными в виде протяжённых тел с шириной выходов, не превышающей первых километров. Шестая компонента отвечает в большей степени пропилитам, поскольку имеет более характерную полосу поглощения в 8 канале, что свойственно для хлорита, эпидота, амфиболов, кальцита. Тем не менее шестая компонента может представлять собой лишь шумовую характеристику спектральной зоны изображения, поэтому в данном случае сама по себе

не может рассматриваться как надежное средство интерпретации метасоматитов пропилитового профиля. Остальные компоненты (PC1, PC2, PC5) не имеют геологической интерпретации.

На основании данных анализа SWIR диапазона снимка ASTER методами искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент для рудного поля Актогай разработана схема размещения метасоматически изменённых пород (рис. 6). Как видно из полученной схемы, для месторождений Актогайского поля характерна метасоматическая зональность, представленная тремя сменяющимися друг друга от тыловых областей к фронтальным зонами – филлизитов, аргиллизитов и пропилитов. Таким образом, по результатам обработки и интерпретации SWIR и TIR диапазонов снимка ASTER в строении метасоматического ореола рудного поля Актогай можно выделить внутреннюю, промежуточную и внешнюю зоны.

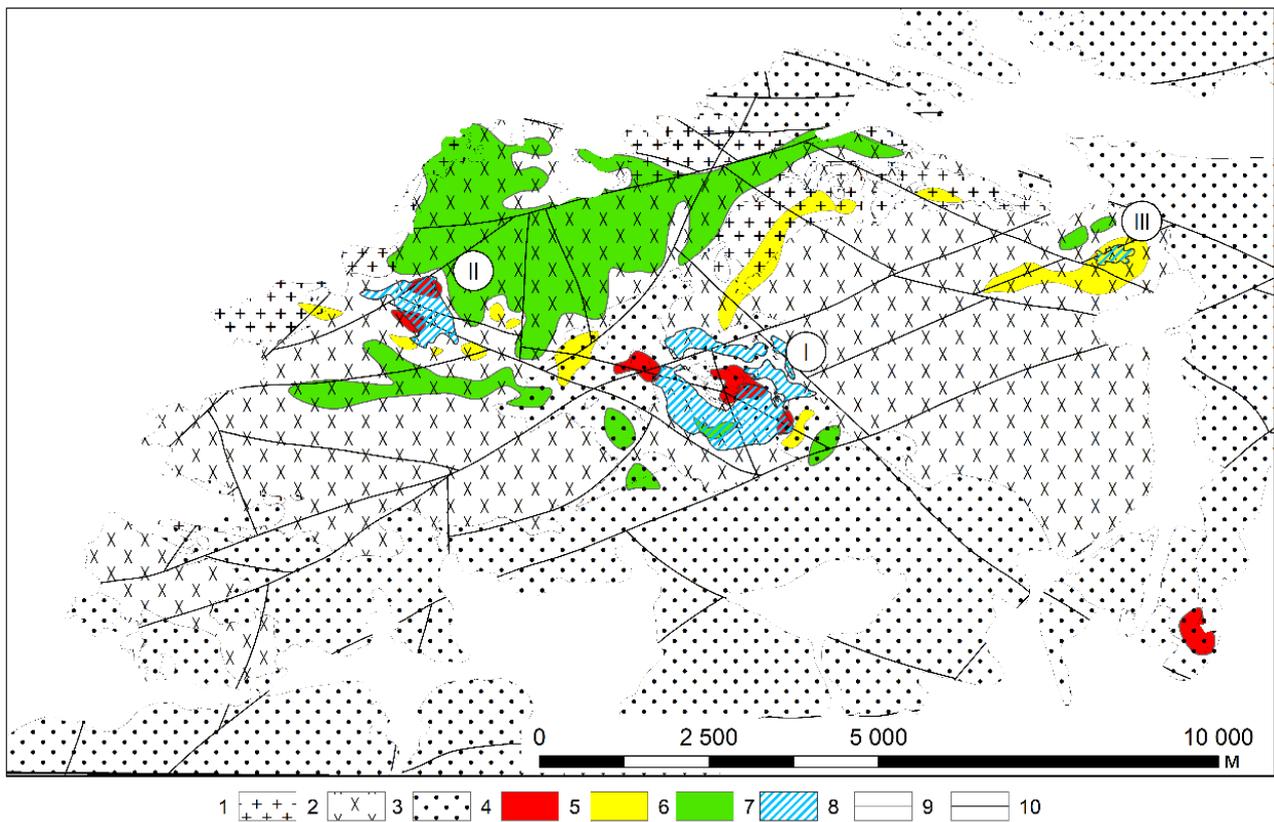


Рис. 6. Структурно-метасоматическая модель Актогайского рудного поля по результатам дешифрирования материалов Landsat-8 и ASTER: 1 – современные аллювиальные образования, 2 – граниты мелко- и среднезернистые (Сз), 3 – диориты и гранодиориты (Сз), 4 – вмещающие вулканогенно-осадочные породы, 5 – метасоматиты внутренней зоны, 6 – метасоматиты промежуточной зоны, 7 – метасоматиты внешней зоны, 8 – положение рудных штоков: I – Актогай, II – Айдарлы, III – Кызылкия (по результатам геолого-разведочных работ), 9 – геологические границы, 10 – разрывные нарушения

Fig. 6. Structural-metasomatic model of the Aktogay ore field based on the results of Landsat-8 and ASTER data interpretation: 1 – modern alluvial formations, 2 – fine- and medium-grained granites (Сз), 3 – diorites and granodiorites (Сз), 4 – host volcanogenic-sedimentary rocks, 5 – metasomatites of the inner zone, 6 – metasomatites of the intermediate zone, 7 – metasomatites of the outer zone, 8 – position of ore stockworks: I – Aktogay, II – Aidarly, III – Kyzylkia (based on the results of geological exploration), 9 – geological boundaries, 10 – faults

Внутренняя зона проявлена в материалах ASTER характерными минимальными значениями в 5, 6 и 12 каналах и высокими значениями 4, 7, и 13, что выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по красноватому оттенку. В минеральных индексах зоне соответствуют значимые величины $M\Gamma^3$, Fillit, OHI. В методе главных компонент их положению частично отвечает 4 главная компонента.

Промежуточная зона проявлена полосой поглощения в 6 канале и высокими значениями в 4 и 7, что выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по розоватому оттенку. В минеральных индексах зона выявляется по значимым величинам индексов KLI, OHI, Fillit. В методе главных компонент промежуточной зоне соответствует 4 компонента.

Внешняя зона проявлена характеристической полосой поглощения в 8 канале и высокими значениями в 7 и 9, что также выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по зеленоватому оттенку. В минеральных индексах положение внешней зоны соответствует значимым величинам индексов $Amf \pm MgOH$, RBD8, $MgOH$, $Ep \pm Chl \pm Amf$, CLI.

Метасоматиты внутренней и промежуточной зон представляют собой изометричные тела размерами от 200 до 800 м. Метасоматиты промежуточных зон нередко имеют продолговатую форму, их размеры обычно не превышают 1 км, чаще около 400 м по удлинению. Наибольшую площадь занимают метасоматиты внешней зоны. Они располагаются в зоне от первых сотен метров от орудене-

ния до 5 км и имеют широкое распространение по периферии рудного поля, занимая первые десятки кв. км. Положение рудных штокверков месторождений Актогай и Айдарлы пространственно частично совпадает с положением метасоматитов внутренней зоны, а штокверк месторождения Кызылкия лежит в области проявления метасоматитов промежуточной зоны.

Выводы

Таким образом, положение рудных штокверков месторождений Актогай, Айдарлы и Кызылкия контролируется зонами сопряжения разломов запад-северо-западного простирания, продольных к простиранию Прибалхашско-Илийского ВПП и разломов северо-восточного простирания, поперечных по отношению к ВПП. Метасоматиты представлены тремя разновидностями, от тыловых областей до фронтальных – это филлизитовые, аргиллизитовые и пропилитовые. Положение рудных штокверков соответствует положению выявляемых в дистанционных данных филлизитовых метасоматитов. Сопоставление выявленной метасоматической зональности с картой метасоматитов рудного поля Актогай показало весьма высокую сходимость. Методика комплексного анализа данных SWIR диапазона ASTER способами искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент является достаточной для выявления минеральных ассоциаций метасоматитов медно-порфириновых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездов В.С. Модели меднопорфириновых рудно-магматических систем и месторождений для прогноза, поисков и оценки: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2022. – 553 с.
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Economic Geology*. – 1970. – Vol. 65. – № 4. – P. 373–408. DOI: 10.2113/gsecongeo.65.4.373.
3. Porphyry copper formation driven by water-fluxed crustal melting during flat-slab subduction / T. Lamont, M. Loader, N. Roberts, F. Cooper, J. Wilkinson, D. Bevan, A. Gorecki, A. Kemp, T. Elliott, N. Gardiner, S. Tapster // *Nature Geoscience*. – 2024. – Vol. 17. – P. 1306–1315. DOI: 10.1038/s41561-024-01575-2.
4. Звездов В.С., Куликов Д.А. Вулкано-плутонические пояса и медно-порфириновые системы Новой Гвинеи: обстановки формирования и металлогения // *Отечественная геология*. – 2024. – № 6. – С. 20–50. – DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10028.
5. Звездов В.С. Влияние геотектонических обстановок формирования вулкано-плутонических поясов на металлогению медно-порфириновых рудных районов и узлов // *Отечественная геология*. – 2024. – № 5. – С. 54–70. DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10023.
6. О перспективах открытия новых золото-медно-порфириновых месторождений малмыжского типа на территории Нижнего Приамурья (Дальний Восток, Россия) / О.В. Петров, В.В. Шатов, А.И. Ханчук, В.В. Иванов, Ю.П. Змиевский, В.И. Шпикерман, Е.О. Петров, В.В. Снежко, А.В. Шманяк, А.В. Молчанов, В.О. Халенев, Н.В. Шатова, Н.В. Родионов, Б.В. Беляцкий, С.А. Сергеев // *Региональная геология и металлогения*. – 2023. – № 94. – С. 75–112. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112.
7. Гурман М.А., Корнеева С.И. Перспективы комплексной переработки первичной золото-медно-порфириновой руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 12. – С. 92–102. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.
8. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) – a new satellite-imaging system / L.C. Rowan, S.J. Hook, M.J. Abrams, J.C. Mars // *Economic Geology*. – 2003. – Vol. 98. – P. 1018–1027. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.5.1019
9. 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. – P. 350–366. DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00127-x
10. 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. – P. 161–186. DOI: 10.1130/GES00044.1

11. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration – application to northern Patagonia Mountains, Arizona / B.R. Berger, T.V. King, L.C. Morath, J.D. Phillips // *Economic Geology*. – 2006. – Vol. 98. – P. 1003–1018. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.5.1003
12. Kruse F.A. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 24.1. – P. 31–51. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90004-1
13. 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. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009
14. Tommaso I.D., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the infernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews* – 2007. – Vol. 32 (1–2). – P. 275–290. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
15. Crosta A.P., McMoore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain // *Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. – 1989. – P. 1173–1187.
16. Alteration zones detection using image-based and spectrum-based image processing techniques to Aster data: Sonajil copper deposit / N. Esmaeilzadeh, S. Barak, N.D. Gani, A. Imamalipour, M. Abedi, A.B. Pour // *2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – Pasadena, CA, USA, 2023. – P. 3700–3703. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281515.
17. From pixels to deposits: porphyry mineralization with multispectral convolutional neural networks / U. Zidan, H.A.E. Desouky, M.M. Gaber, M.M. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 16. – P. 9259–9271. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3321714.
18. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Кокшетау, 2003. – 329 с.
19. Современное состояние изученности геодинамики и металлогении Жонгаро-Балхашской складчатой системы / Э.Ю. Сейтмуратова, Я.К. Аршамов, Р.Т. Баратов, С. Бакдаuletкызы, Д.О. Даутбеков, Ж.И. Сатемирова // *Горный журнал Казахстана*. – 2015. – № 3. – С. 12–16. URL: <https://rucont.ru/efd/456880> (дата обращения 30.03.2025).
20. Геологическая карта: L-(43),(44) (Талды-Курган). Геологическая карта СССР. Геологическая карта, масштаб: 1:1000000 / под ред. Н.А. Афоничева. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1974. – 354 с.
21. Бахтеев М.К. Палеозойские орогенные вулканоплутонические пояса. – М.: Недра, 1987. – 168 с.
22. Беспяев Х.А., Париллов Ю.С. Условия образования месторождений меди, свинца, цинка и железа Казахстана: (по результатам изучения флюидных включений). – Алматы: Гылым, 1998. – 352 с.
23. Особенности минерального и элементного состава бедных руд месторождений Актогай и Бозшаколь / А.А. Антоненко, Н.М. Жуков, Л.Е. Герцен, Т.В. Гойколова // *Изв. АН РК. Сер. геологии и технических наук*. – 2016. – № 4. – С. 18–27.
24. EarthExplorer // USGS science for a changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 10.04.2022).
25. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions / A.B. Pour, Y. Park, S. Park Tae-Yoon, J.K. Hong, M. Hashim, J. Woo, I. Ayoobi // *Geocarto International*. – 2018. – Vol. 34. – P. 1–64. DOI: 10.1080/10106049.2018.1434684.
26. USGS Spectral library version7: U.S. Geological Survey Data Series 1035 / R.F. Kokaly, R.N. Clark, G.A. Swayze, K.E. Livo, T.M. Hoefen, N.C. Pearson, R.A. Wise, W.M. Benzel, H.A. Lowers, R.L. Driscoll, A.J. Klein. – 2017. – 61 p.
27. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. – Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2002. – 135 p.
28. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill Curnamona province of Australia / R.D. Hewson, T.J. Cudahy, S. Mizuhiko, K. Ueda, A.J. Mauger // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99 (1–2). – P. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
29. 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. – Vol. 99. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
30. Ninomiya Y. A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data // *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – Toulouse, France, 21–25 July 2003. – Vol. 3. – P. 1552–1554.
31. Ready P.J., Wintz P.A. Information extraction, SNR improvement, and data compression in multispectral imagery // *IEEE Trans. Commun.* – 1973. – Vol. 21. – P. 1123–1130.

Сведения об авторах

Федор Евгеньевич Сейров, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. fes2@tpu.ru

Юрий Сергеевич Ананьев, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Поступила в редакцию: 04.04.2025

Поступила после рецензирования: 05.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Zvezdov V.S. *Models of copper porphyry ore-magmatic systems and deposits for forecasting, prospecting and evaluation*. Dr. Diss. Moscow, 2022. 553 p. (In Russ.)
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, 1970, vol. 65, pp. 373–408.
3. Lamont T.N., Loader M.A., Roberts N.M.W. Porphyry copper formation driven by water-fluxed crustal melting during flat-slab subduction. *Nat. Geosci.*, 2024, vol. 17, pp. 1306–1315. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01575-2>.
4. Zvezdov V.S., Kulikov D.A. Volcano-plutonic belts and porphyry copper systems of New Guinea: Formation environments and metallogeny. *Domestic geology*, 2024, vol. 6, pp. 20–50. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10028.
5. Zvezdov V.S. The effect of the geotectonic settings of volcano-plutonic belts on the metallogeny of the porphyry copper ore regions and clusters. *Domestic geology*, 2024, vol. 5, pp. 54–70. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10023.
6. Petrov O.V., Shatov V.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Zmieviskiy Yu.P., Shpikerman V.I., Petrov E.O., Snezhko V.V., Shmanyak A.V., Molchanov A.V., Khalenev V.O., Shatova N.V., Rodionov N.V., Belyatskiy B.V., Sergeev S.A. On the prospects for the discovery of new Malmyzh-type gold-copper-porphyry deposits in the Lower Amur region (Far East, Russia). *Regional geology and metallogeny*, 2023, vol. 94, pp. 75–112. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112 (In Russ.)
7. Gurman M.A., Korneeva S. I. Prospects of integrated processing of primary gold-bearing porphyry copper ore. *Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, vol. 12, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.
8. Rowan L.C., Hook S.J., Abrams M.J., Mars J.C. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) – a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1018–1027.
9. 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, pp. 350–366.
10. 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, pp. 161–186.
11. Berger B.R., King T.V.V., Morath L.C., Phillips J.D. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration – application to northern Patagonia Mountains, Arizona. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1003–1018.
12. Kruse F.A. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 31–51.
13. 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.
14. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 2007, vol. 32 (1–2), pp. 275–290. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
15. Crosta A.P., McMoore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. *Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. Calgary, Alberta, Canada, Erim, 1989. pp. 1173–1187.
16. Esmaeilzadeh N., Barak S., Gani N. D., Imamalipour A., Abedi M., Pour A.B. Alteration zones detection using image-based and spectrum-based image processing techniques to Aster data: Sonajil Copper Deposit. *IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Pasadena, CA, USA, 2023. pp. 3700–3703. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281515.
17. Zidan U., El Desouky H.A., Gaber M.M., Abdelsamea M.M. From pixels to deposits: porphyry mineralization with multispectral convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, vol. 16, pp. 9259–9271. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3321714.
18. Mazurov A.K. *Geodynamic settings of formation of metallogenic complexes of Kazakhstan*. Dr. Diss. Kokshetau, 2003. 329 p. (In Russ.)
19. Seitmuratova E.Yu., Arshamov Ya.K., Baratov R.T., Bakdauletkyzy S., Dautbekov D.O., Satemirova Zh.I. Current state of knowledge of geodynamics and metallogeny of the Zhongaro-Balkhash folded system. *Mining Journal of Kazakhstan*, 2015, no. 3, pp. 12–16. (In Russ.) Available at: <https://rucont.ru/efd/456880> (дата обращения 30.03.2025).
20. *Geological map: L-(43), (44) (Taldy-Kurgan)*. *Geological map of the USSR*. Geological map, scale: 1:1000000. Ed. by N.A. Afonichev. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1974. (In Russ.)
21. Bakhteyev M.K. *Paleozoic orogenic volcano-plutonic belts*. Moscow, Nedra Publ., 1987. 168 p. (In Russ.)
22. Bespayev H.A., Parilov Yu.S. Bespayev H.A., Parilov Yu.S. *Conditions of formation of copper, lead, zinc and iron deposits in Kazakhstan: (based on the results of studying fluid inclusions)*. Almaty, Gylym Publ., 1998. 352 p. (In Russ.)
23. Antonenko A.A., Zhukov N.M., Gerzen L.Ye., Goikolova T.V. Features of mineral and element composition of poor ores of deposits Aktogay and Bozshakol. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences*, 2016, no. 4, pp. 18–27. (In Russ.)
24. EarthExplorer. *USGS science for a changing world*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 10 April 2024).
25. Pour A.B., Park Y., Park Tae-Yoon S., Hong J.K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. *Geocarto International*, 2018, vol. 34, pp. 1–64. DOI: 10.1080/10106049.2018.1434684.
26. Kokaly R.F., Clark R.N., Swayze G.A., Livo K.E., Hoefen T.M., Pearson N.C., Wise R.A., Benzel W.M., Lowers H.A., Driscoll R.L., Klein A.J. *USGS Spectral library version7: U.S. Geological Survey Data Series*, 2017, 1035, 61 p.
27. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *Advances in Space Research*. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 2002. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.035.
28. Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger A.J. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99 (1–2), pp. 159–172.

29. 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, vol. 99, pp. 127–139.
30. Ninomiya Y. A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France, 21–25 July 2003. Vol. 3, pp. 1552–1554.
31. Ready P.J., Wintz P.A. Information extraction, SNR improvement, and data compression in multispectral imagery, *IEEE Trans. Commun.*, 1973, vol. 21, pp. 1123–1130.

Information about the authors

Fedor E. Seirov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; fes2@tpu.ru

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Received: 04.04.2025

Revised: 05.05.2025

Accepted: 16.06.2025