

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.3.072+528.8 (571.66)

Структурно-метасоматическая модель эпипермальных месторождений по данным дистанционных съёмок на примере Малетойваямского и Мутновского рудных полей (Камчатский край)**Сейров Ф. Е., Ананьев Ю. С.**

НИ ТПУ, г. Томск, Россия

Аннотация. Приведены результаты структурно-вещественного дешифрирования Малетойваямского и Мутновского рудных полей по материалам дистанционных съёмок Landsat-8, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model), ArcticDEM (Arctic Global Digital Elevation Model) и Google Earth. Положение продуктивных вулканических ареалов контролируется главными продольными и диагональными по отношению к вулcano-плутоническим поясам разломами. Структурный контроль жил низкосульфатного (LS) оруденения Мутновского рудного поля осуществляется крутопадающими внутрикальдерными разломами, структурный контроль оруденения и метасоматитов высокосульфатных (HS) рудопроявлений Малетойваямского рудного поля – зонами сопряжения концентрических и радиальных внутрикальдерных разломов. Околорудные метасоматиты выявлялись методами минимизации ограниченной энергии, ложных цветов, минеральных индексов, спектрального угла. На месторождениях LS-типа могут быть проявлены серицит-кварцевые метасоматиты, оруденение может как накладываться на них, так и не совпадать с ними в пространстве. На месторождениях HS-типа оруденение накладывается на зональные вторичные кварциты.

Ключевые слова: Мутновское, Малетойваямское, эпипермальные месторождения, дистанционные методы, метасоматическая зональность, ASTER, Landsat-8, ArcticDEM.

Для цитирования: Сейров Ф. Е., Ананьев Ю. С. Структурно-метасоматическая модель эпипермальных месторождений по данным дистанционных съёмок на примере Малетойваямского и Мутновского рудных полей (Камчатский край). Руды и металлы. 2026. № 3. С. 16–33. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10012.

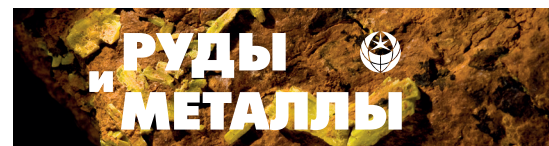
Structural-metasomatic model of epithermal ore deposits, based on remote sensing data: a case study of the Maletovayam and Mutnovsky ore fields, Kamchatka**Seyrov F. E., Ananyev Yu. S.**

National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, Russia

Abstract. The paper presents results of geological interpretation of the Maletovayam and Mutnovsky ore fields, that was performed based on the Landsat-8 and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) remote sensing data. The Google Earth imagery and the global digital elevation models ASTER GDEM and ArcticDEM were also used to identify the structural patterns. The wallrock metasomatites were revealed using spaceborne infrared spectroscopy methods, including the constrained energy minimization, false-color composites, mineral indices, and spectral angle mapping ones. It was determined that the epithermal ore fields are situated within areas of volcanic activity. At the regional scale, location of the productive zones is controlled by the major faults oriented longitudinally and diagonally relative to the volcano-plutonic belts. At the local scale, veins of the low-sulfate mineralization of the Mutnovsky ore field are structurally controlled by steeply dipping intra-caldera faults, whereas the high-sulfate mineralization of the Maletovayam ore field is controlled by zones of conjugation of the concentric and radial intra-caldera faults. The wallrock metasomatites are also controlled by zones of conjugation of the radial and concentric structures. Analysis of the ASTER data has identified four varieties of the metasomatically altered rocks: mono-quartz, sericite-quartz, sericite-kaolinite-quartz, and alunite-quartz ones. At the low-sulfate type ore deposits, sericite-quartz metasomatites may be present, and mineralization may either overprint them or occur spatially independently. At the high-sulfate type ore deposits, the mineralization is superimposed on the zonal secondary quartzites.

Keywords: Mutnovsky, Maletovayam, epithermal ore deposits, remote sensing methods, metasomatic zoning, ASTER, Landsat-8, ArcticDEM.

For citation: Seyrov F. E., Ananyev Yu. S. Structural-metasomatic model of epithermal ore deposits, based on remote sensing data: a case study of the Maletovayam and Mutnovsky ore fields, Kamchatka. Ores and metals. 2026. No. 3. pp. 16–33. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10012.



Введение

Эпитермальные системы являются на данный момент одним из важных источников благородных и цветных металлов. Наиболее распространённый принцип классификации этих систем как принадлежащих к высоко-, низкосульфатному либо промежуточному типу основан на фугитивности серы в процессах изменения термобарических условий и взаимодействия флюида с вмещающими породами [22]. В качестве объекта исследований низкосульфатного (low-sulfidation, LS) оруденения нами выбрано Мутновское рудное поле, высокосульфатного (high-sulfidation, HS) оруденения – Малетойваямское рудное поле. Они расположены в составе Восточно-Олюторско-Камчатско-Курильского (ВОКК) и Корякско-Центрально-Камчатского (КЦК) вулканоплутонических поясов (ВПП) соответственно [6].

В настоящее время выявление гидротермальных систем по материалам дистанционных данных освещено в статьях [1, 15, 25]. Несмотря на наличие публикаций по данной тематике, остаётся открытым вопрос выбора надёжного комплекса методов для выявления эпитермальных систем обоих типов по комплексным материалам открытых источников (таких как Landsat-8, ASTER, ASTER GDEM, ArcticDEM, Google Earth) в климатических условиях Российской Федерации. В настоящей статье на основании результатов обработки спутниковых данных для двух рудных полей, а также анализа существующих материалов по данной тематике предлагается обобщённая прогнозная модель эпитермальных систем HS- и LS-типа.

Исходные материалы и их предварительная обработка

В работе использованы материалы съёмки Landsat-8, ASTER, ASTER GDEM, ArcticDEM и открытые материалы GoogleEarth.

ASTER содержит 14 спектральных каналов: три в диапазоне VNIR (visible and near-infrared), шесть в диапазоне SWIR (short-wave infrared), пять в диапазоне TIR (thermal infrared) [10].

Для Малетойваямского рудного поля использованы снимки AST_L1T_0030828200000

5159_20150411091144_76475 и AST_L1T_00308282000005150_20150411091144_76474 [13].

Для Мутновского рудного поля использован снимок AST_L1T_00309242004003829_20150506041847_66080 [13].

К снимкам ASTER применялись следующие методы обработки: радиометрическая коррекция, атмосферная коррекция, приведение к отражательной способности.

Landsat-8 содержит 11 спектральных каналов: четыре спектральных и один панхроматический в диапазоне VNIR, четыре в диапазоне SWIR и два в диапазоне TIR [20].

Для Малетойваямского рудного поля использованы снимки Landsat-8: LC08_L2SP_098018_20151010_20200908_02_T1_SR, LC08_L2SP_097018_20130810_20200912_02_T1_SR, LC08_L2SP_096017_20150621_20200909_02_T1_SR, LC08_L2SP_096018_20160710_20200906_02_T1_SR.

Для Мутновского рудного поля использованы снимки Landsat-8: LC08_L2SP_099023_20130909_20200913_02_T1_SR, LC08_L2SP_099022_20140912_20200910_02_T1_SR [14].

Материалы ASTER GDEM и ArcticDEM представляют собой цифровые модели рельефа (ЦМР). Разрешение пиксела ASTER GDEM составляет 30 м; ArcticDEM – 2 м [11]. Для обработки данных этих съёмок использовалась отмывка рельефа [7].

Google Earth [16] представляет собой платформу, объединяющую данные космических и аэросъёмки. Она содержит данные программ Landsat, Sentinel, WorldView, Pleiades и другие [17]. В работе использованы трёхцветные растры, приближенные к естественным цветам, с разрешением близким к 0,5 м. Источник данных используемых сцен – Airbus.

Методы работы со снимками

Обработка спектральных данных и цифровых моделей рельефа позволила выявить структурные особенности территорий и области распространения метасоматически изменённых пород.

Разрывные нарушения в спектральных каналах выявляются по смещению видимых геологических границ и элементов рельефа, по

Таблица. Минеральные индексы характерных минеральных ассоциаций метасоматитов (по материалам [18, 21])

Table. Mineral indices of characteristic mineral assemblages of metasomatites (based on [18, 21])

Индекс	Формула вычисления	Интерпретация
MI ³	$\frac{\text{band12} \times \text{band14}^3}{\text{band13}^4}$	Участки окварцевания, основность горных пород
SiO ₂	$\frac{\text{band12}}{\text{band13}}$	Основность пород
QI	$\frac{\text{band11}^2}{\text{band10} \times \text{band12}}$	Кварцевые породы
Fillit	$\frac{\text{band5} + \text{band7}}{\text{band6}}$	Филлитовый индекс. Слюдистые минералы (преимущественно серицит)
KLI	$\frac{\text{band4}}{\text{band5}} \times \frac{\text{band8}}{\text{band6}}$	Каолинит
OHl	$\frac{\text{band7}}{\text{band6}} \times \frac{\text{band4}}{\text{band6}}$	ОН-содержащие минералы (гидрослюды)
ALI	$\frac{\text{band7}}{\text{band5}} \times \frac{\text{band7}}{\text{band8}}$	Алунитовый индекс
Fe ³⁺	$\frac{\text{band2}}{\text{band1}}$	Трёхвалентное железо

смене тона по разные стороны от нарушения, по прямолинейным участкам рек и бортов долин. В ЦМР они проявляются также в виде прямолинейных элементов строения рельефа (речные долины, крутые борта долин, резкая смена поднятых и опущенных в рельефе областей).

Более детальная статистическая информация о разрывных нарушениях в пределах рудных полей получена при совместном анализе данных Google Earth и ArcticDEM на крупных обнажённых участках рудных полей. Анализ включал в себя выделение в пределах обнажений разрывных нарушений по данным Google Earth и определение их элементов залегания.

Выявление метасоматитов производилось по данным Landsat-8 и ASTER. Для наиболее эффективного выявления метасоматитов по материалам Landsat-8 нами использован метод минимизации ограниченной энергии (constrained energy minimization, CEM) [12].

Детальный анализ проводился с использованием снимков ASTER и методов искусственных цветов и минеральных индексов. Для выделения областей распространения глинисто- и серицитсодержащих метасоматитов методом искусственных цветов использовался композит из каналов ASTER № 4, 6 и 8 в палитре RGB. В составе такого композита области распространения филлизитов и аргиллизитов проявлены в розоватых тонах [23].

Минеральные индексы позволяют определять вещественный состав изучаемых площадей через отношение отражательной способности пиксела в различных каналах. Используемые в работе минеральные индексы приведены в таблице.

Спектр выявленных методами искусственных цветов и минеральных индексов метасоматитов извлекался и анализировался путём сопоставления с эталонными минеральными



спектрами библиотек NASA [24]. Картирование метасоматических зон по выявленным спектрам производилось методом спектрального угла [19].

Мутновское золото-серебро-полиметаллическое LS-месторождение

Краткая геологическая характеристика.

Месторождение Мутновское расположено в Камчатском крае в южной части Камчатского полуострова в 60 км к юго-западу от города Петропавловск-Камчатский. Месторождение локализовано в пределах Восточно-Олюторско-Камчатско-Курильского ВПП (P_3-N_2) в Южно-Камчатском рудном районе. Для эпitherмальных систем Южно-Камчатского района характерна связь с породами диорит-андезитовой вулcano-плутонической ассоциации [6]. Помимо Мутновского в данном районе известны также полиметаллические и благородно-металльные месторождения Вилучинское, Родниковое, Быстринское и др. [6, 9].

В структурном плане месторождение приурочено к Жировской палеовулканической постройке (рис. 1). Постройка лежит в поле субмеридионально ориентированных сбросов в зоне их сопряжения с Мутновским глубинным разломом северо-восточного простирания. Продуктивная жильная минерализация приурочена к субмеридиональным разломам [8].

В строении территории выделяются три структурных этажа. Нижний, смятый в пологие складки, сложен преимущественно вулканитами среднего и основного состава, их туфами, а также, в меньшей степени, морскими терригенными отложениями (ахотенская, жировская, мутновская толщи, асачинская свита). Месторождение Мутновское лежит по большей части в пределах выхода на дневную поверхность образований нижнего структурного этажа. Средний этаж представлен полого залегающими дацитами, андезитами, базальтами и их туфами (алнейская серия). Эти образования преобладают в периферийной части жировской постройки и непосредственно на месторождении практически не представлены. Верхний структурный этаж –

четвертичные базальтовые покровы к западу от месторождения. В пределах рудной зоны четвертичные водно-ледниковые отложения перекрывают терригенно-вулканогенные толщи нижнего структурного этажа [8, 9].

Интрузивные образования, проявленные в районе месторождения Мутновское, представлены четырьмя комплексами – олигоценным (в основном андезиты), миоценовым (андезиты, базальты, кварцевые порфиры, диориты), плиоценовым (андезиты), четвертичным (базальты, андезибазальты) – и проявлены преимущественно в виде субвулканических тел – даек, силлов, некков. Непосредственно в рудной зоне наиболее распространены диориты миоценового комплекса, слагающие вытянутое в северо-восточном направлении тело протяженностью около 3 км, расширяющееся и имеющее ряд апофиз.

Большая часть запасов месторождения принадлежит жиле Определяющая, протяженной в субмеридиональном направлении на расстояние около 3 км. Жильные тела месторождения распространены на площади около 10–15 км². Всего на месторождении известно на данный момент более 160 жильных и штоковых тел кварцевого и кварц-карбонатного составов. Из-за различий в составах руд в разных частях месторождения на протяжении рудной жилы Определяющая выделено три фланга:

1. северный, содержащий малосульфидную золото-серебряную минерализацию;
2. южный, содержащий золото-серебряно-полиметаллическую минерализацию;
3. центральный, содержащий оба типа минерализации.

Также на месторождении отмечаются марганцевые руды, связанные с кварц-карбонатными прожилками [8, 9]. На месторождении отмечаются кварц-карбонатные и кварц-серцитовые метасоматиты [3, 8, 9].

Региональный структурно-вещественный анализ. В материалах Landsat-8 при изучении южной части Восточно-Олюторско-Камчатско-Курильского ВПП выявлен ряд линейных и кольцевых (дуговых) структур (рис. 2).

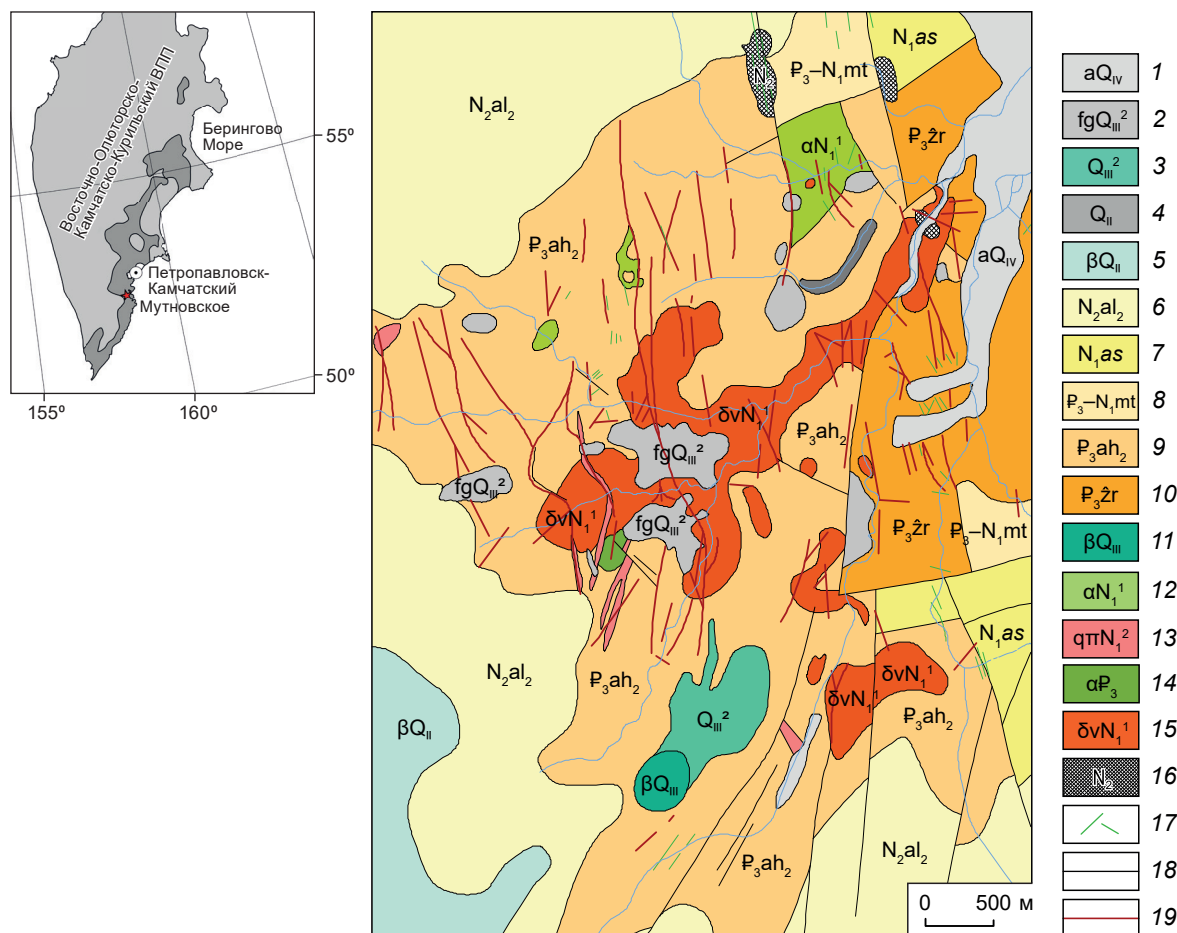


Рис. 1. Карта месторождения Мутновское (по материалам [10]):

1 – аллювиальные отложения; 2 – водно-ледниковые отложения; 3 – базальты, лавобрекчии базальтов; 4 – туффы, пемзовые туфы; 5 – базальты, андезибазальты, их туфы, конгломераты, туфопесчаники; 6 – алнейская серия (витрокластические туфы, дациты, андезиты и их туфы); 7 – асачинская свита (туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туффы, туфы, андезиты); 8 – мутновская толща (туфопесчаники, туфоалевролиты, туффы, туфы); 9 – ахомтенская толща (андезиты и их туфы, лавобрекчии андезитов, андезибазальтов, туфоалевролиты, алевролиты, аргиллиты); 10 – жировская толща (туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туффы, туфы); 11 – четвертичный комплекс (базальты, андезибазальты); 12, 13 – миоценовый комплекс: 12 – андезиты, андезибазальты, 13 – кварцевые порфиры; 14 – олигоценый комплекс (андезиты); 15 – диориты, габбродиориты; 16 – брекчии диатрем; 17 – дайковые тела четвертичного и миоценового комплексов; 18 – тектонические нарушения; 19 – гидротермальные жилы

Fig. 1. Geological map of the Mutnovsky ore deposit (based on [10]):

1 – alluvial deposits; 2 – fluvioglacial deposits; 3 – basalts, basaltic lava breccias; 4 – tuffites, pumice tuffs; 5 – basalts, basaltic andesites, their tuffs, conglomerates, tuffaceous sandstones; 6 – Alney Series (vitroclastic tuffs, dacites, andesites and their tuffs); 7 – Asacha Formation (tuffaceous gravelstones, tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffites, tuffs, andesites); 8 – Mutnovsky sequence (tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffites, tuffs); 9 – Akhomten sequence (andesites and their tuffs, andesite and basaltic andesite lava breccias, tuffaceous siltstones, siltstones, mudstones); 10 – Zhirovsky sequence (tuffaceous gravelstones, tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffites, tuffs); 11 – Quaternary complex (basalts, basaltic andesites); 12, 13: Miocene complex: 12 – andesites, basaltic andesites, 13 – quartz porphyries; 14 – Oligocene complex (andesites); 15 – diorites, gabbro-diorites; 16 – diatreme breccias; 17 – dikes of the Quaternary and Miocene complexes; 18 – tectonic faults; 19 – hydrothermal veins

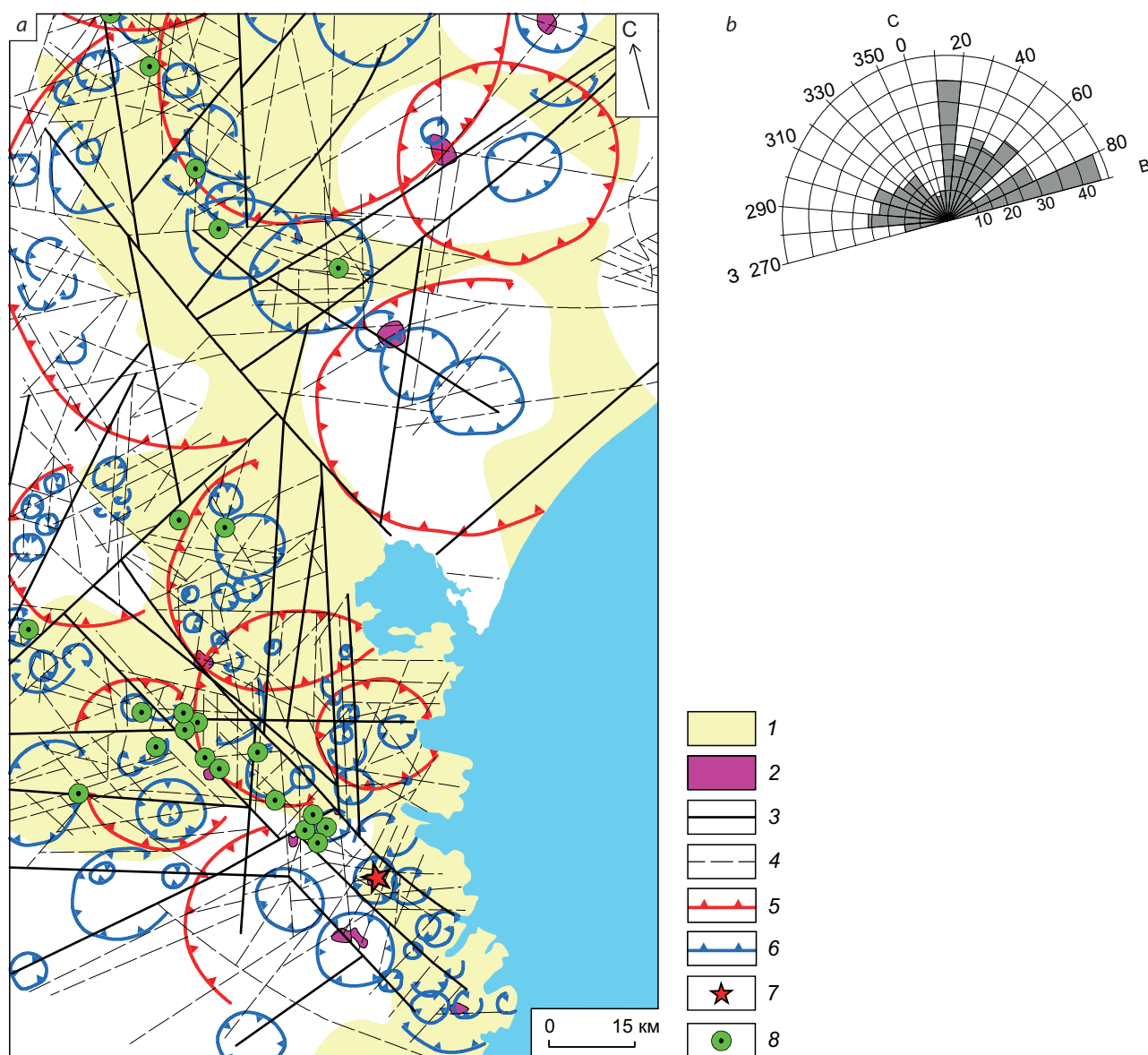


Рис. 2. Структурная модель южной части Восточно-Олюторско-Камчатско-Курильского ВПП по материалам Landsat-8:

a – линейные и кольцевые структуры, метасоматиты; *b* – роза-диаграмма линейных разрывных нарушений; 1 – области распространения вулканитов ВОКК по материалам [3, 6]; 2 – глинисто- и серицитсодержащие метасоматиты по материалам Landsat-8; 3 – линейные разрывные нарушения первого порядка; 4 – линейные разрывные нарушения второго порядка; 5 – структуры проседания; 6 – структуры оседания и вулканические постройки; 7 – месторождение Мутновское; 8 – месторождения и рудопроявления золота, серебра, ртути, полиметаллов

Fig. 2. Structural model of the southern East Olyutorsky–Kamchatka–Kuril volcanic-plutonic belt, based on Landsat-8 data:

a – linear and ring structures, metasediments; *b* – rose diagram of the linear faults; 1 – distribution areas of East Olyutorsky–Kamchatka–Kuril belt volcanics, based on data from [3, 6]; 2 – clay- and sericite-containing metasediments, based on Landsat-8 data; 3 – first-order linear faults; 4 – second-order linear faults; 5 – subsidence structures; 6 – settling structures and volcanic edifices; 7 – Mutnovsky ore deposit; 8 – ore deposits and occurrences of gold, silver, mercury, and polymetals

Структуры были классифицированы по размерам и морфологии.

Линейные разрывные нарушения по протяжённости разделяются на структуры первого и второго порядка. Структуры первого порядка – это разломы протяжённостью более 50–60 км. Как правило, они лучше проявлены в рельефе и практически всегда трассируются крупными водотоками. Смещение геологических границ и элементов рельефа вдоль таких нарушений может достигать первых десятков километров. Также эти разломы часто разделяют разновозрастные структурные комплексы. Структуры второго порядка – разрывные нарушения протяжённостью до 50 км, часто ограниченные разрывными нарушениями первого порядка. Структуры второго порядка хуже проявлены в рельефе и редко смещают геологические границы и границы рельефа более чем на первые километры.

По ориентировке по отношению к ВПП все линейные разрывные нарушения могут быть разделены на следующие группы:

1. продольные разломы север-северо-восточного простирания (азимут примерно 10–20°);
2. поперечные разломы запад-северо-западного простирания (азимут примерно 280–290°);
3. диагональные разломы северо-восточного и северо-западного простирания (азимут простирания 290–340° и 20–60°);
4. диагональные нарушения восток-северо-восточные (азимут простирания 80–90°).

Кольцевые и дуговые структуры также были разделены на порядки. Структуры первого порядка – диаметром более 40 км. В зоне влияния таких структур лежит практически вся территория ВОКК ВПП и смежные территории. Эти структуры распознаются по характерной кольцеобразной морфологии элементов рельефа (хребтов, рек, узких понижений) и контролируют области распространения покровных вулканитов и интерпретируются как вулcano-тектонические депрессии над магматическими камерами. Структуры второго порядка – диаметром от 10 до 40 км. Они интерпретируются как структуры оседания над

промежуточными вулканическими очагами. Структуры третьего порядка – диаметром до 10 км. Они интерпретируются как частные вулканические постройки, в пределах пояса распространены в виде цепочек вдоль главных линейных разрывных нарушений. Рудное поле Мутновское лежит в центральной части одной из таких построек.

В целом в региональных структурах отмечается приуроченность вулканических построек к линейным структурам первого порядка и зонам их сопряжения. Преимущественно вулканизм проявлен вдоль разломов 1-й и 3-й групп, то есть приурочен к разрывным нарушениям продольным и диагональным по отношению к ВПП.

Известные рудные поля контролируются областями, которые ограничены сближенными разломами первого порядка 3-й группы, ориентированными преимущественно по азимуту 300–330°. Эти же участки характеризуются наибольшим количеством структур оседания и вулканических построек. Здесь же наиболее распространены разрывные нарушения второго порядка 3-й и 4-й групп (диагональные по отношению к ВОКК ВПП).

Метасоматически изменённые каолинит-содержащие и серицит-кварцевые породы, выявляемые методом минимизации ограниченной энергии по материалам Landsat-8, распространены в виде отдельных небольших (до первых километров) изометричных проявлений внутри ВОКК ВПП и на склонах более молодых вулканов за его пределами.

Месторождение Мутновское расположено в зоне влияния сближенных разломов первого порядка 3-й группы в области сопряжения разломов второго порядка 2-й, 3-й и 4-й групп в центральной части вулканоструктуры третьего порядка. Вулканоструктура сложная, в неё входят несколько сближенных кальдер проседания диаметрами до 5 км. В центральной части структуры по материалам обработки Landsat-8 проявлен метасоматоз.

Структурно-метасоматическая модель. В материалах ASTER на территории Мутновского месторождения методами искусственных

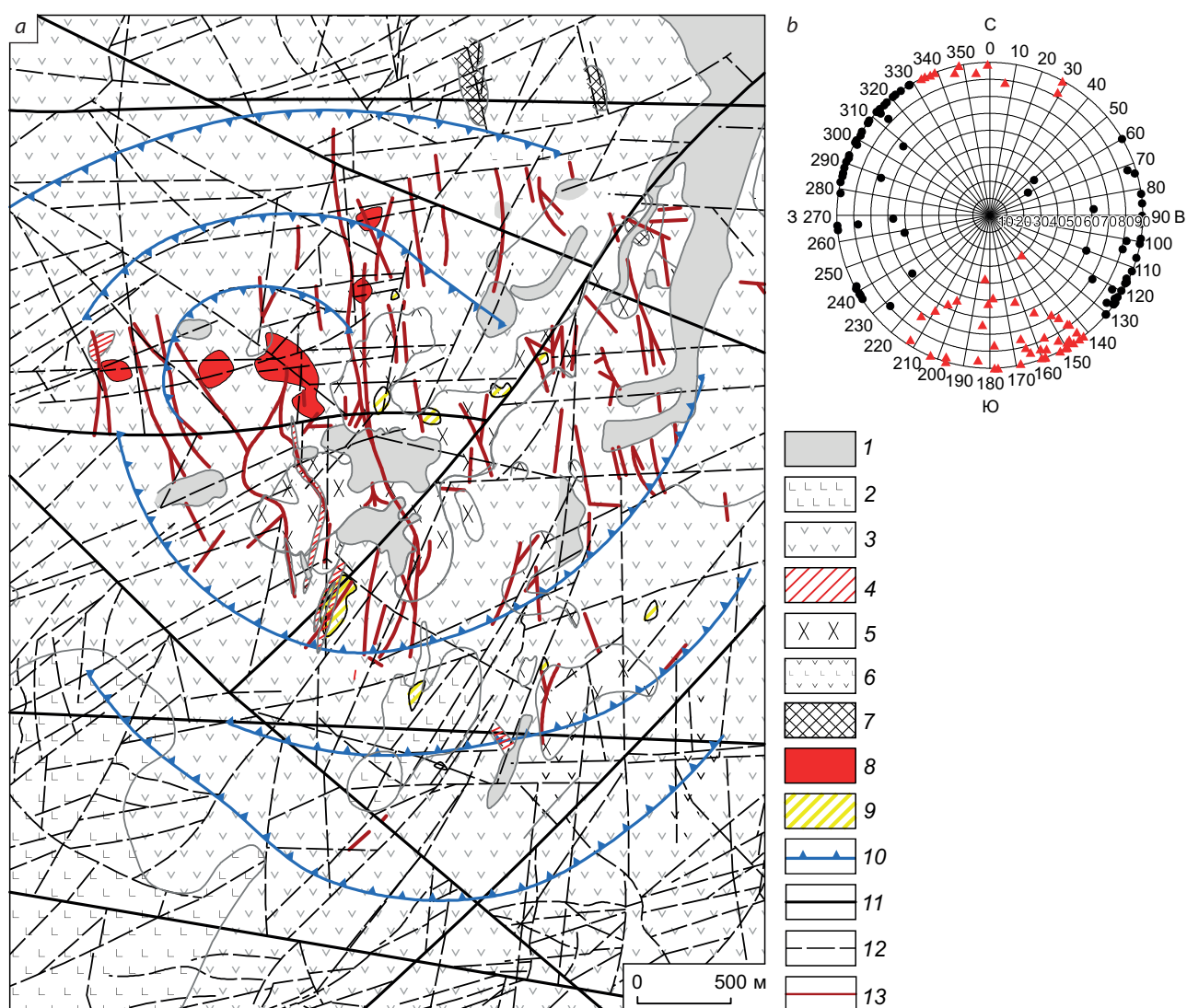


Рис. 3. Структурно-метасоматическая модель рудного поля Мутновское:

a – внутрикальдерные структуры; *b* – стереографическая проекция (на верхнюю полусферу) разломов, зафиксированных в зонах метасоматически изменённых пород (красные треугольники – разломы первой группы, чёрные точки – разломы второй группы); 1 – аллювиальные отложения; 2 – базальты, лавобрекчи базальтов; 3 – дациты, андезиты и их туфы; 4 – кварцевые порфиры; 5 – диориты, габбродиориты; 6 – андезибазальты; 7 – брекчи диатрем; 8 – серицит-кварцевые метасоматиты; 9 – области окисленных сульфидов; 10 – вулканоструктуры; 11 – разломы первого и второго порядка; 12 – разломы третьего порядка; 13 – рудные жилы

Fig. 3. Structural-metasomatic model of the Mutnovsky ore field:

a – intracaldera structures; *b* – stereographic projection of faults (projection onto the upper hemisphere), recorded in zones of metasomatically altered rocks (dots indicate the position of the faults identified within zones of metasomatite distribution; red triangles are faults of the first group; black dots are faults of the second group); 1 – alluvial deposits; 2 – basalts, basaltic lava breccias; 3 – dacites, andesites, and their tuffs; 4 – quartz porphyry; 5 – diorites, gabbrodiorites; 6 – basaltic andesites; 7 – diatreme breccias; 8 – sericite-quartz metasomatites; 9 – areas of oxidized sulfides; 10 – volcanic structures; 11 – faults of the first and second order; 12 – faults of the third order; 13 – ore veins

цветов и минеральных индексов выявляются серицит-кварцевые метасоматиты, а также участки лимонитизации (рис. 3).

В методе искусственных цветов серицит-кварцевые метасоматиты проявлены в составе композита из каналов ASTER № 4, 6 и 8 областями с розовой окраской. Зоне филлизитизации отвечают значимые величины минеральных индексов Fillit, Fe^{3+} , SiO_2 . Зоны распространения окисленных сульфидов выделены по значимым величинам индекса Fe^{3+} .

Выявляемые в материалах ASTER изменённые породы месторождения Мутновское проявлены в виде отдельных областей, по размеру редко превышающих 100–200 м и рассеянных по широкой площади (до 20 км²). Наиболее крупное проявление изменённых пород наблюдается в центральной части месторождения на удалении около 400 м от жилы Определяющая, оно представлено филлизитами. Рудные жилы вытянуты в направлении удлинения тела метасоматически изменённых пород. Размер тела метасоматитов по удлинению составляет около 500 м при ширине 150–200 м.

В структурном плане в пределах Мутновского рудного поля выделяются разрывные нарушения третьего порядка, интерпретируемые как радиальные и концентрические структуры. Отмечается приуроченность крупных рудоносных жил к радиальным структурам ССЗ-ССВ ориентировки. При этом рудные тела ориентированы по направлению одного из разломов второго порядка.

Структурный анализ положения метасоматически изменённых пород в материалах Google Earth и ArcticDEM производился в обнажённых областях, содержащих в основном серицитовые метасоматиты. Выявлялись и анализировались разломы преимущественно протяжённостью до первых сотен метров, реже до первых километров. В районе распространения серицитовых метасоматитов выделены следующие разновидности разломов:

1. близкие по простиранию к ближайшему сегменту видимой дуги вулканоструктуры – такие разломы интерпретируются как фраг-

менты концентрических структур внутри кальдерных построек;

2. разнонаправленные – могут интерпретироваться как радиальные структуры или деформации, вызванные внешними внекальдерными напряжениями.

Стереографическая схема всех выявленных структур изображена на рис. 3, б. Как видно из рис. 3, метасоматически изменённые породы месторождения Мутновское лежат в зонах сопряжения радиальных, концентрических и внекальдерных разломов. При этом чёткая приуроченность к рудоконтролирующим структурам явно не прослеживается.

Малетойваямское месторождение HS-типа

Краткая геологическая характеристика. Малетойваямское месторождение расположено на севере Корякско-Центрально-Камчатского вулканоплутонического пояса в пределах Ветроваямской зоны [4, 6]. На территории рудного поля выделяются три основных участка: Юго-Западное в юго-западной части поля, Гатчинг в юго-восточной части и Юбилейное на северо-западе площади [2, 5].

В структурном плане рудное поле приурочено к центральной части кальдеры стратовулкана. Известные месторождения находятся в зонах влияния радиальных разломов. Практически вся область месторождения лежит в поле глубинных разломов северо-восточного простирания – Вывенско-Ватынского на севере и Ватынского на юге. Разломы приурочены к шовной зоне сочленения Центрально-Корякской и Олюторской структурно-формационных зон [2, 5].

Стратифицированные образования представлены терригенными разностями ранне-неогеновой пахачинской свиты с прослоями карбонатов и углистых образований, которые перекрываются в пределах рудного поля вулканогенно-осадочными толщами туфопесчаников и андезитов ветроваямской свиты. Осадочные комплексы прорываются на некотором удалении от рудного поля субвулканическими телами андезитов и андезидацитов,

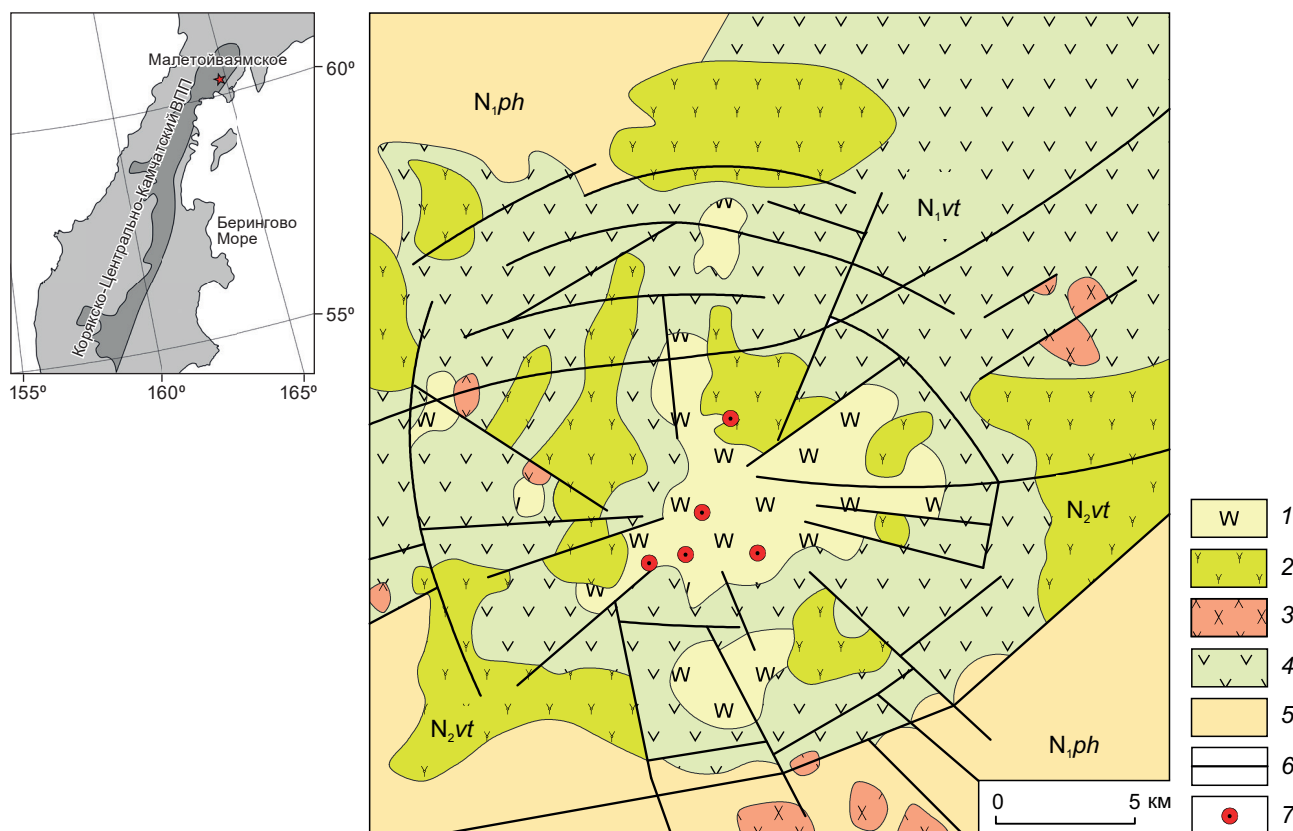


Рис. 4. Геологическая карта месторождения Малетойваям [2, 5, 6]:

1 – метасоматиты нерасчленённые; 2 – ветроваямская свита, андезиты; 3 – субвулканические интрузии, андезиты, андезито-дациты; 4 – ветроваямская свита, андезиты, туфы, туфопесчаники; 5 – пахачинская свита, песчаники, гравийники; 6 – разломы; 7 – известные месторождения и рудопроявления

Fig. 4. Geological map of the Maletoyvayam ore deposit [2, 5, 6]:

1 – undifferentiated metasomatites; 2 – Vetrovayam Formation, andesites; 3 – subvolcanic intrusions, andesites, andesite-dacites; 4 – Vetrovayam Formation, andesites, tuffs, tuffaceous sandstones; 5 – Pakhacha Formation, sandstones, gravelstones; 6 – faults; 7 – known ore deposits and mineral occurrences

комагматичных ветроваямским вулканитам (рис. 4) [5].

Значительные площади в границах рудного поля занимают метасоматиты. Зональность метасоматических изменений от тыловой до фронтальных областей известных проявлений: монокварциты → алуни-серицит-кварцевые метасоматиты → пропилиты [5].

Региональный структурно-вещественный анализ. В материалах Landsat-8 в северной части Корякско-Центрально-Камчатского ВПП выявлен ряд линейных и кольцевых (дуговых)

структур. Как и в районе ВОКК ВПП, разломы проявлены в рельефе по смещениям линейных элементов, крутым бортам долин, спрямлённым руслам водотоков. Наблюдаются также смещения видимых геологических границ и смена фототона по разные стороны от разрывных нарушений.

Линейные структуры по протяжённости разделены на разломы первого и второго порядка. Разломы первого порядка – наиболее протяжённые структуры, длина которых достигает до первых сотен километров. Как правило,

в рельефе они наиболее проявлены, нередко трассируются водотоками и гребнями хребтов. Разломы второго порядка заключены между главными разрывными нарушениями. Их длина редко превышает 50–60 км.

По ориентировке по отношению к ВПП все разломы могут быть разделены на группы следующим образом (рис. 5):

1. продольные (азимут простираения 50–80°);
2. поперечные (азимут простираения 320–350°);
3. диагональные по отношению к КЦК ВПП (ориентированные по азимутам 10–50° и 280–310°).

Дуговые и кольцевые структуры первого порядка (диаметр 80 км и более) интерпретируются как вулcano-тектонические депрессии над коровыми магматическими камерами. Структуры второго порядка интерпретируются как структуры оседания над сближенными или одиночными крупными вулканическими камерами (диаметр от 7 до 80 км), структуры третьего порядка – вулканические постройки и кальдеры проседания (диаметр до 5–7 км).

Как видно из структурной схемы исследуемого района (рис. 5), рудные месторождения в пределах сближенных Корякско-Центрально-Камчатского и Пенжинско-Западно-Камчатского ВПП, а также прилегающих территорий локализируются в зонах повышенной вулканической активности. Такие зоны фиксируются по скоплениям вулканоструктур второго порядка и, как правило, лежат во внутренних зонах вулcano-тектонических депрессий. Структурный контроль положения вулканических ареалов в пределах КЦК ВПП осуществляется сближенными линейными продольными разломами первого порядка (1-й группы). В близлежащем Пенжинско-Западно-Камчатском ВПП контроль вулканических ареалов осуществляется как продольными, так и диагональными сближенными разломами первого порядка (1-й и 3-й группы). Известные рудные поля, в т. ч. Малетойваямское, контролируются диагональными по отношению к ВПП разломами первого и второго порядка.

Глинисто- и серицитсодержащие метасоматиты в материалах Landsat-8 выделялись с использованием метода СЕМ для эталонных спектров каолинита, гётита, эпидота. Как видно из схемы (рис. 5), известные рудные поля в пределах ВПП сопровождаются площадными ореолами метасоматически изменённых пород. Малетойваямское рудное поле пространственно совпадает с крупным (до 20 км по удлинению) метасоматическим ореолом.

Структурно-метасоматическая модель. Метасоматически изменённые породы рудного поля Малетойваям выявляются в материалах ASTER методами искусственных цветов и минеральных индексов. Метасоматический ореол включает четыре разновидности метасоматитов, зоны которых сменяют друг друга от тыловых к фронтальным следующим образом: преимущественно монокварцевые, серицит-каолинит-кварцевые, каолинитовые с кварцем, алуни-кварцевые (рис. 6, а).

Монокварцевые метасоматиты преобладают в центральной части поля. Их положение контролируется зонами сопряжения разнонаправленных разрывных нарушений размером от 100 до 700 м, вдоль которых тела монокварцитов часто вытянуты. Выявляются по совокупности значимых величин индекса MI^3 и QI , в составе композита из каналов ASTER № 4, 6 и 8 в палитре RGB слабо проявлены в виде зеленоватых областей. В SWIR-диапазоне ASTER характеризуются наиболее низким отражением по сравнению со смежными областями, имеют слабую полосу поглощения в каналах № 6 и 8. В композите из результатов СЕМ для эталонных спектров каолинита, лимонита и эпидота в каналах Landsat-8 в палитре RGB проявлены светло-голубоватым цветом.

Каолинит-серицит-кварцевые метасоматиты занимают обширные области, сменяя в пространстве монокварцевые тела: как правило, они проявлены в плотную к полям монокварцитов и вытянуты в том же направлении. Мощность ореолов каолинит-серицит-кварцевых метасоматитов достигает первых километров (редко более трёх-четырёх). Они вы-

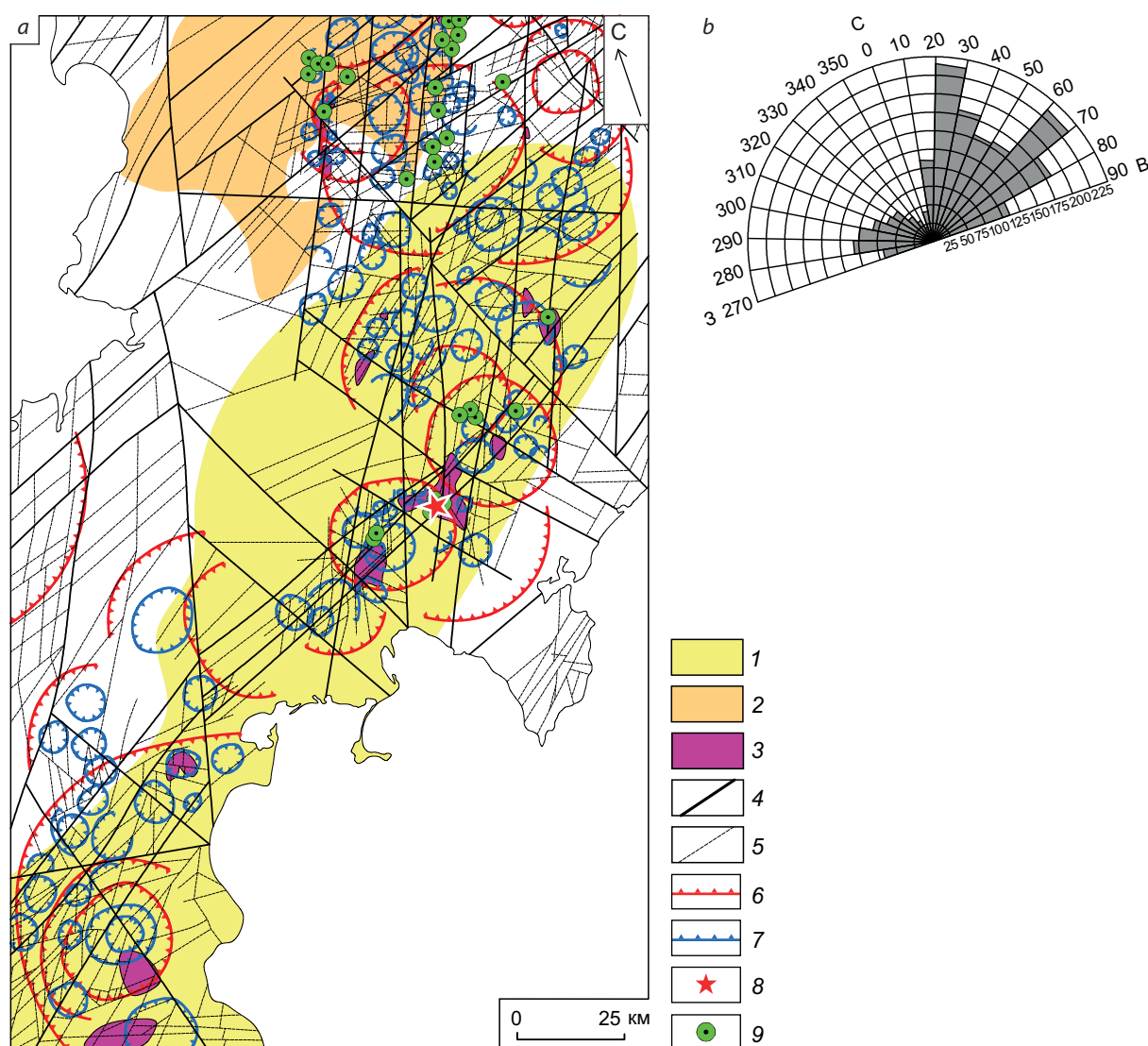


Рис. 5. Структурная модель северной части Корьякско-Центрально-Камчатского ВПП и прилегающих территорий по материалам Landsat-8:

a – линейные и кольцевые структуры, метасоматиты; *b* – роза-диаграмма линейных разрывных нарушений; 1 – области распространения вулканитов КЦК ВПП по материалам [4, 6]; 2 – области распространения вулканитов Пенжинско-Западно-Камчатского ВПП [4, 6]; 3 – глинисто- и серицитсодержащие метасоматиты по материалам Landsat-8; 4 – линейные разрывные нарушения первого порядка; 5 – линейные разрывные нарушения второго порядка; 6 – кальдеры оседания; 7 – вулканические постройки; 8 – рудное поле Малетойваямское; 9 – месторождения и рудопроявления золота, серебра, ртути, полиметаллов [4]

Fig. 5. Structural model of the northern Koryak–Central Kamchatka volcanic-plutonic belt and the adjacent areas, based on Landsat-8 data:

a – linear and ring structures, metasomatites; *b* – rose diagram of linear faults; 1 – distribution areas of volcanics of the Koryak–Central Kamchatka volcanic-plutonic belt (based on [4, 6]); 2 – distribution areas of volcanics of the Penzhina–West Kamchatka volcanic-plutonic belt [4, 6]; 3 – clay- and sericite-containing metasomatites (based on Landsat-8 data); 4 – first-order linear faults; 5 – second-order linear faults; 6 – subsidence calderas; 7 – volcanic edifices; 8 – Maletoyvayam ore field; 9 – gold, silver, mercury, and polymetallic deposits and occurrences [4]

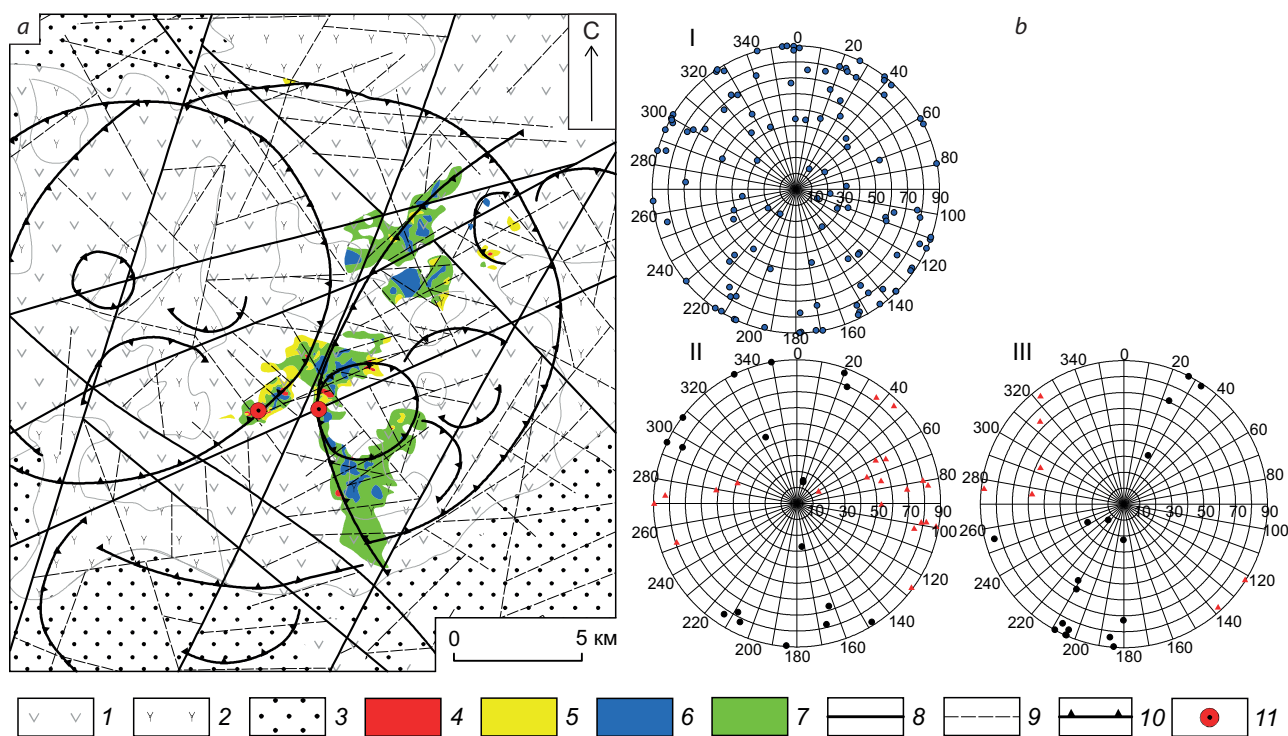


Рис. 6. Структурно-метасоматическая модель рудного поля Малетойваям:

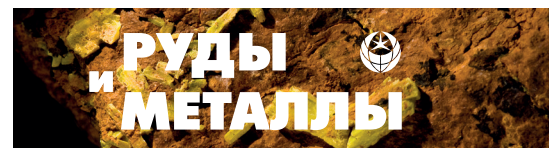
a – внутрикальдерные структуры; *b* – стереографическая проекция (на верхнюю полусферу) разломов, зафиксированных в зонах метасоматически изменённых пород: I – положение разломов, выявленных в зонах распространения метасоматитов; II – проекции разломов рудопроявления Гатчинг; III – проекции разломов рудопроявления Юго-Западное (на рис. II и III красные треугольники – разломы первой группы, чёрные точки – разломы второй группы); 1 – андезиты и их туфы; 2 – андезиты; 3 – песчано-гравийные отложения; 4 – кварц-алунитовые метасоматиты; 5 – аргиллизиты; 6 – монокварциты; 7 – кварц-серицитовые метасоматиты; 8 – разрывные нарушения первого и второго порядка; 9 – разрывные нарушения третьего порядка (радиальные и концентрические); 10 – структуры оседания и вулканические кальдеры; 11 – рудопроявления Гатчинг на востоке и Юго-Западное на западе

Fig. 6. Structural-metasomatic model of the Maletoivayam ore field:

a – intracaldera structures; *b* – stereographic projection (onto the upper hemisphere) of faults identified within zones of metasomatically altered rocks: I – position of faults identified in zones of metasomatite distribution; II – projections of faults at the Gatching ore occurrence; III – projections of faults at the Yugo-Zapadnoye ore occurrence; 1 – andesites and their tuffs; 2 – andesites; 3 – sand-and-gravel deposits; 4 – quartz-alunite metasomatites; 5 – argillic alteration; 6 – monoquartzites; 7 – quartz-sericite metasomatites; 8 – first- and second-order faults; 9 – third-order faults (radial and concentric); 10 – subsidence structures and volcanic calderas; 11 – known ore occurrences: Gatching (in the east) and Yugo-Zapadnoye (in the west); in panels II and III, the red triangles indicate the first-group faults, and the black dots indicate the second-group faults

являются в каналах SWIR-диапазона ASTER по характерным полосам поглощения в каналах № 5 и 6, в составе композита из каналов ASTER № 4, 6 и 8 проявлены в виде бордовых и бордово-зеленоватых областей. В минеральных индексах им также соответствуют значимые величины MI^3 и QI .

Каолинит-кварцевые метасоматиты преимущественно образуют ряд удлинённых по простиранию всего ореола областей. Ширина проявлений, как правило, не превышает 400–500 м, длина – до первых километров. Пространственно они частично совпадают с рудными зонами известных месторождений



в пределах поля. В SWIR-диапазоне ASTER они выделяются по поглощению в каналах № 5 и 6 с меньшим поглощением в канале № 4 по сравнению с каолинит-серицит-кварцевыми метасоматитами; в составе композита из каналов ASTER № 4, 6 и 8 проявлены в виде розоватых областей. В минеральных индексах выявляются значимыми величинами индекса KLI и слабыми положительными аномалиями индекса OHI на фоне монокварцитов и каолинит-серицит-кварцевых метасоматитов. В составе композита из результатов СЕМ для эталонных спектров каолинита, лимонита и эпидота в каналах Landsat-8 в палитре RGB имеют характерные жёлтый и слабо-оранжевый цвета.

Алунит-кварцевые метасоматиты в пределах поля образуют сравнительно небольшие, редкие, преимущественно изометричные тела размерами до 500–600 м. Как правило, они располагаются внутри зон развития каолинит-кварцевых метасоматитов в непосредственной близости от рудных зон месторождений Малетойваямского рудного поля. В SWIR-диапазоне ASTER выявляются по характерному поглощению в каналах № 5 и 6 с преобладанием поглощения в канале № 5, в составе композита из каналов ASTER № 4, 6 и 8 проявлены в виде розоватых областей. В минеральных индексах проявлены значимыми величинами индекса ALI и слабыми положительными аномалиями индекса OHI, в составе композита из результатов СЕМ для эталонных спектров каолинита, лимонита и эпидота в каналах Landsat-8 в палитре RGB имеют жёлтый цвет.

Как видно из рис. 6, известные рудопоявления локализованы в зонах влияния продольных и диагональных по отношению к ВПП структур. В пределах структур оседания оруденение сосредоточено в зонах сопряжения вулканических кальдер и более крупных структур оседания с линейными радиальными разломами. В метасоматическом ореоле рудопоявления не всегда локализуются в тыловых зонах метасоматического ореола. В районе рудопоявлений Юго-Западное и Гатчинг прослеживается пространственная связь меж-

ду оруденением и локальными проявлениями каолинитовых и кварц-алунитовых метасоматитов.

Детальный структурный анализ производился в районе обнажений метасоматически изменённых пород по материалам Google Earth и ArcticDEM. Выявляемые разломы разделены на группы следующим образом:

1. концентрические (сонаправлены с ближайшими сегментами кальдер);

2. радиальные и связанные с внешними напряжениями (разнонаправленные структуры).

Как видно из стереографической проекции (рис. 6, б), зоны метасоматически изменённых пород контролируются радиальными и концентрическими разломами внутри кальдер. Анализ разломов, снятых в районе рудопоявлений Гатчинг и Юго-Западное, показал, что они контролируются различными вулканоструктурами (приурочены к разным кальдерам). Отдельно можно отметить схожий характер разломов рудных зон и всех контролирующих метасоматиты структур. Это говорит о том, что рудный флюид использовал для миграции те же нарушения, что и активные гидротермы, образовавшие зонально построенный метасоматический ореол.

Выводы

Комплексная обработка дистанционных материалов Landsat-8, ASTER, ArcticDEM, Google Earth по рудным полям эпитепмальных систем Малетойваямского высокосульфатного и Мутновского низкосульфатного рудных полей позволила провести структурный анализ на региональном и локальном уровне, а также выявить метасоматически изменённые породы.

На основании полученных результатов можно сравнить эти объекты и составить модели низкосульфатных и высокосульфатных систем, а также выделить их критерии по материалам дистанционных съёмки.

Для низкосульфатного оруденения. На региональном уровне целевыми объектами являются вулканические ареалы, проявленные в виде скоплений кольцевых структур первого и второго порядка, контролируемые главными

линейными нарушениями, диагональными по отношению к простирацию ВПП. Кальдеры, вмещающие оруденение, контролируются разломами второго порядка, секущими главные разломы, контролирующие вулканический ареал. В материалах Landsat-8 отмечаются небольшие отдельные проявления нерасчленяемых глинисто- и серицитсодержащих метасоматитов.

На локальном уровне кальдеры проявляют сложное внутреннее строение, обусловленное многоактными проседаниями. Рудные жилы локализуются в центральной части и контролируются радиальными и концентрическими разломами, параллельными разломам второго порядка внутри кальдеры. Метасоматиты контролируются зонами сопряжённых концентрических и радиальных разломов, частично совпадающих с рудоконтролирующими структурами. Метасоматиты не имеют прямой пространственной связи с оруденением, которое может частично совпадать по местоположению с кварц-серицитовыми метасоматитами и областями окисленной сульфидной минерализации.

Для высокосульфатного оруденения. На региональном уровне целевыми объектами являются вулканические ареалы, проявленные в виде скоплений кольцевых структур второго и третьего порядка, контролируемые главными линейными нарушениями, продольными по отношению к простирацию ВПП в зоне их сопряжения с главными диагональными разломами. В материалах Landsat-8 сопровождаются ореолами серицитовых и глинистых метасоматитов, занимающих десятки и сотни км².

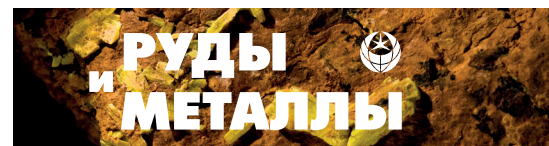
Список литературы

1. *Ананьев Ю. С., Житков В. Г., Поцелуев А. А.* Прогнозно-поисковая модель эпипермальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 84–92. – doi: 10.18799/24131830/2019/5/270.
2. *Бортников Н. С., Толстых Н. Д.* Эпипермальные месторождения Камчатки (Россия) // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 1. – С. 124–152. – doi: 10.1134/S1075701523070176.
3. *Государственная геологическая карта Российской Федерации.* Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N-57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. – СПб. : Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ, 2006. – 376 с.

На локальном уровне форма кальдер высокосульфатных систем близка к изометричной. Оруденение сосредоточено в периферийной части, контролируется зонами сопряжения концентрических и радиальных разломов, то есть теми же структурами, что и метасоматиты. Оруденение локализуется в составе метасоматического ореола. Относительно рудных тел зональность от тыловых частей к фронтальной следующая: алуни-кварцевые, каолинит-кварцевые метасоматиты, монокварциты, каолинит-серицит-кварцевые метасоматиты.

Анализ структур позволяет предположить, что LS-оруденение Мутновского рудного поля сформировалось в обстановке значительно большего растяжения, чем HS-оруденение Малетойвямского рудного поля. Основными подводящими каналами для низкосульфатного оруденения являлись разломы, оперяющие разлом второго порядка в центре кальдеры. Высокосульфатное оруденение приурочено к кальдерам без видимого сильного внешнего растяжения, которым свойственны изометричность и простота строения. Центральная часть такой кальдеры значительно менее проницаема, что препятствует смешению восходящих потоков флюида и инфильтрирующихся метеорных вод. Рудоподводящими здесь являлись зоны сопряжённых концентрических и радиальных структур, которые отводили оруденение на периферию вулканоструктуры, где и формировались минерализованные зоны.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-27-00462).



4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист Р-58 – Пенжинская губа. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. – 384 с.
5. Гурин Г. В. Опыт применения геофизических методов при поисках эпitherмальных месторождений золота (на примере Малотойвямского золоторудного поля, Камчатка) // Литосфера. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 116–132. – doi: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132.
6. Мигачев И. Ф., Минина О. В., Звездов В. С. Корякско-Камчатский регион – потенциальная медно-порфировая провинция // Отечественная геология. – 2020. – № 4–5. – С. 3–23. – doi: 10.47765/0869-7175-2020-10020.
7. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 7. – С. 117–127. – doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
8. Швейгерт П. Е., Жегунов П. С., Москалева С. В. Рудная минерализация северного фланга Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2024. – № 1 (61). – С. 72–82. – doi: 10.31431/1816-5524-2024-1-61-72-82.
9. Шишканова К. О., Округин В. М., Философова Т. М. Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка) // Руды и металлы. – 2022. – № 3. – С. 78–100. – doi: 10.47765/0869-5997-2022-10018.
10. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER user handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. – Pasadena : Jet Propulsion Laboratory, 2002. – 135 p.
11. Arctic DEM Explorer [Электронный ресурс]. – URL: <https://livingatlas2.arcgis.com/> (дата обращения: 04.12.2025).
12. Chang C.-I. Constrained Energy Minimization (CEM) for Hyperspectral Target Detection: Theory and Generalizations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2024. – V. 62, art. No 5522921. – doi: 10.1109/TGRS.2024.3424281.
13. Earthdata Search [Электронный ресурс]. – URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/Search> (дата обращения: 12.09.2025).
14. EarthExplorer // USGS science for a changing world [Электронный ресурс]. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 10.09.2025).
15. Ferrier G., Ganas A., Pope R., Jo Miles A. Prospecting mapping for epithermal deposits of western Milos using a fuzzy multi criteria evaluation approach parameterized by airborne hyperspectral remote sensing data // Geosciences. – 2019. – V. 9, No 3. – P. 116. – doi: 10.3390/geosciences9030116.
16. Google Планета Земля [Электронный ресурс]. – URL: <https://earth.google.com/> (дата обращения: 04.12.2025).
17. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. – 2017. – V. 202. – P. 18–27. – doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
18. Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual Compiled by Remote Sensing Applications Geoscience. – Australia, Center of Geographic Sciences. – 2004.
19. Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. W., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J., Goetz A. F. H. The spectral image processing system (SIPS)–interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // Remote Sensing of Environment. – 1993. – V. 44, No 2–3. – P. 145–163. – doi: 10.1016/0034-4257(93)90013-N.
20. Landsat 8 Data Users Handbook // Handbooks & Guides | Landsat Science [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> (дата обращения: 04.09.2025).
21. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 108. – P. 54–72. – doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
22. Sillitoe R. H., Hedenquist J. W. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the Earth / ed. S. F. Simmons, I. J. Graham. – Littleton: Society of Economic Geologists, 2003. – V. 10. – P. 315–343.
23. Tommaso I. D., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geology

Reviews. – 2007. – V. 32 (1–2). – P. 275–290. – doi: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004.

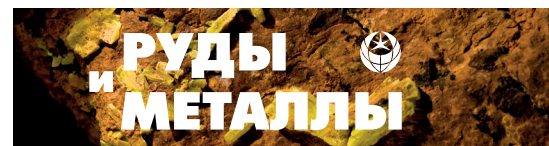
24. USGS Spectral Library version 7: U. S. Geological Survey Data Series 1035. – 2017. – 61 p.

25. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., Hecker C. A., Bakker W. H.,

Noomen M. F., van der Meijde M., Carranza E. J. M., de Smeth J. B., Woldai T. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – V. 14, No 1. – P. 112–128. – doi: 10.1016/j.jag.2011.08.002.

References

1. Anan'ev Yu. S., Zhitkov V. G., Potseluev A. A. Prognozno-poiskovaya model' ehpterimal'nykh Au-Ag mestorozhdenii kislотно-sul'fatnogo tipa po dan-nym deshifirovaniya sovremennykh kosmicheskikh snimkov (na primere rudnogo polya Svetloe, Khabarovskii krai) [Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field Svetloe, Khabarovskiy kray)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2019, Vol. 330, No 5, pp. 84–92. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/5/270.
2. Bortnikov N. S., Tolstykh N. D. Ehpterimal'nye mestorozhdeniya Kamchatki (Rossiya) [Epithermal deposits of Kamchatka (Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of ore deposits]*, 2023, Vol. 65, No 1, pp. 124–152. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1075701523070176.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N-57 – Petropavlovsk-Kamchatskii. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Koryak-Kamchatka Series. Sheet N-57 – Petropavlovsk-Kamchatsky. Explanatory note], St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2006, 376 p.
4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Koryaksko-Kuril'skaya. List P-58 – Penzhinskaya guba. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Koryak-Kuril Series. Sheet P-58 – Penzhina Bay. Explanatory note], St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2016, 384 p.
5. Gurin G. V. Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov pri poiskakh ehpterimal'nykh mestorozhdenii zolota (na primere Maletovayamskogo zolotorudnogo polya, Kamchatka) [Geophysical prospecting for epithermal gold deposits (a case study from the Maletovayam gold ore field, Kamchatka Peninsula)], *Litosfera [Lithosphere]*, 2021, Vol. 21, No 1, pp. 116–132. (In Russ.) DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132.
6. Migachev I. F., Minina O. V., Zvezdov V. S. Koryaksko-Kamchatskii region – potentsial'naya medno-porfirovaya provintsia [Koryak-Kamchatka region: potential porphyry copper province], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2020, No 4–5, pp. 3–23. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2020-10020.
7. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. Analiz vozmozhnosti primeneniya tsifrovyykh modelei rel'efa ASTER GDEM v2 i ArcticDEM dlya issledovaniy arkticheskikh territorii Rossii [Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]*, 2020, Vol. 17, No 7, pp. 117–127. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
8. Shveigert P. E., Zhegunov P. S., Moskaleva S. V. Rudnaya mineralizatsiya severnogo flanga Mutnovskogo zoloto-serebro-polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Kamchatka) [Ore mineralization of the Mutnovskoe gold-silver-base metal deposit, northern flank (Kamchatka)], *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr". Seriya: Nauki o Zemle [Bulletin of Kamchatka regional association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences]*, 2024, No 1 (61), pp. 72–82. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2024-1-61-72-82.
9. Shishkanova K. O., Okrugin V. M., Filosofova T. M. Osobennosti mineralogii rud yuzhnogo flanga zoloto-serebro-polimetallicheskogo mestorozhdeniya Mutnovskoe (Yuzhnaya Kamchatka) [Mineralogy of the ores on the southern flank of the Mutnovskoe gold-silver-polymetallic deposit (Southern Kamchatka)], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2022, No 3, pp. 78–100. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10018.



10. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER user handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 2002, 135 p.
11. Arctic DEM Explorer. – URL: <https://livingatlas2.arcgis.com/> (date of access: December 4, 2025).
12. Chang C.-I. Constrained Energy Minimization (CEM) for Hyperspectral Target Detection: Theory and Generalizations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, Vol. 62, art. No 5522921. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3424281.
13. Earthdata Search. – URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/Search> (date of access: September 12, 2025).
14. EarthExplorer – USGS science for a changing world. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (date of access: September 10, 2025).
15. Ferrier G., Ganas A., Pope R., Jo Miles A. Prospecting mapping for epithermal deposits of western Milos using a fuzzy multi criteria evaluation approach parameterized by airborne hyperspectral remote sensing data, *Geosciences*, 2019, Vol. 9, No 3, pp. 116. DOI: 10.3390/geosciences9030116.
16. Google Planet Earth. – URL: <https://earth.google.com/> (date of access: December 4, 2025).
17. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
18. Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual Compiled by Remote Sensing Applications Geoscience, Australia, Center of Geographic Sciences, 2004.
19. Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. W., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J., Goetz A. F. H. The spectral image processing system (SIPS)–interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data, *Remote Sensing of Environment*, 1993, Vol. 44, No 2–3, pp. 145–163. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90013-N.
20. Landsat 8 Data Users Handbook – Handbooks & Guides | Landsat Science. – URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> (date of access: September 4, 2025).
21. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials, *Ore Geol. Rev.*, 2019, Vol. 108, pp. 54–72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
22. Sillitoe R. H., Hedenquist J. W. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In: *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the Earth*, ed. by S. F. Simmons, I. J. Graham, Littleton, Society of Economic Geologists, 2003, Vol. 10, pp. 315–343.
23. Tommaso I. D., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina, *Ore Geol. Rev.*, 2007, Vol. 32 (1–2), pp. 275–290. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004.
24. USGS Spectral Library version 7: U. S. Geological Survey Data Series 1035, 2017, 61 p.
25. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., Hecker C. A., Bakker W. H., Noomen M. F., van der Meijde M., Carranza E. J. M., de Smeth J. B., Woldai T. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2012, Vol. 14, No 1, pp. 112–128. DOI: 10.1016/j.jag.2011.08.002.

Сейров Федор Евгеньевич (fes2@tpu.ru)
аспирант

Ананьев Юрий Сергеевич

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ), г. Томск, Россия

Seyrov Fedor Evgenievich (fes2@tpu.ru)
Postgraduate student

Ananyev Yuri Sergeevich

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor

School of Natural Resources Engineering

National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, Russia