

УДК 551.441.(571.65)

ЭПИТЕРМАЛЬНАЯ Au–Ag МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ТЕРРИГЕННЫХ ТОЛЩАХ ФУНДАМЕНТА ПЕЧАЛЬНИНСКОЙ ВУЛКАНО-КУПОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2025 г. В. М. Кузнецов^{a, *}, Н. Е. Савва^{b, **}, А. В. Волков^{c, ***},
К. Ю. Мурашов^c, А. Л. Галямов^c, А. В. Григорьева^c

^aВсероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Средний просп., 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия

^bСеверо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия

^cИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: v_kuznetsov12@mail.ru

**e-mail: nsavva7803@mail.ru

***e-mail: tma2105@mail.ru

Поступила в редакцию 19.08.2024 г.

После доработки 02.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Эпитермальна́я Au–Ag минерализация месторождения Печальное вызывает значительный интерес, так как сформировалась в углеродистых терригенных толщах фундамента вулcano-купольной структуры, на удалении около 200 км от границы Охотско-Чукотского окраинноконтинентального вулканического пояса. Геологическое строение месторождения Печальное — двухярусное: кварц-адуляровые и кварцевые Au–Ag жилы локализованы в ороговикованных терригенных породах нижнего яруса, а кварцевых риолитов и комендитов печальнинской толщи верхнего яруса вмещают потенциально-промышленную РЗЭ минерализацию. Продуктивные жилы образуют три зоны субширотного простирания, протяженность жил в которых 200–300 м, иногда — 640, 840 м; средняя мощность 0.1–3 м, редко до 6.2 м, средние содержания: Ag — 266 г/т, Au — 4.4 г/т. Установлены следующие минералогические особенности руд: низкая сульфидность (1–2%); в качестве продуктивных минералов выступают самородное Ag, низкопробное Au, полибазит и высоко селенистый акантит, кроме того, в рудах достаточно широко развиты мышьяковистый пирит, арсенопирит, пирротин, железистый сфалерит, халькопирит и марказит. Геохимические особенности руд хорошо согласуются с минеральным составом. Руды обогащены довольно широким спектром микроэлементов (по рейтингу): Ag, Au, As, Sb, Se, W, Tl, Li, Be, Bi, Cs, Mo, установлено преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, очень низкие Eu/Sm отношения ($<<1$), слабо наклонные близхондритовые спектры (без отчетливых европиевых минимумов или максимумов); соотношение значений Se/Se^* и Eu/Eu^* указывают на окислительные условия при рудообразовании; в спектрах РЗЭ преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы; $\Sigma РЗЭ$ варьирует в широких пределах. Полученные минералого-геохимические данные позволяют отнести минерализацию месторождения Печальное к селеновому подтипу низкосульфидизированного класса эпитермальных месторождений. По геологическим и минералого-геохимическим данным, месторождение может быть отнесено к слабо-эродированным, что позволяет прогнозировать выявление новых, не выходящих на поверхность рудных тел.

Ключевые слова: ОЧВП, вулcano-купольная структура, кварц-адуляровые жилы, текстуры руд, эпитермальна́я минерализация, минералого-геохимические особенности, золото, серебро, модель образования

DOI: 10.31857/S0203030625010038, EDN: HGSTYN

ВВЕДЕНИЕ

На северо-западном фланге Хурчан-Оротуканской тектономагматической активизации (ТМА) (рис. 1) в конце 1970-х гг. были открыты Au–Ag эпитермальные месторождения Печальное и Ветвистое в нижнеюрских черносланцевых толщах фундамента вулcano-купольных структур (ВКС). Кроме того, в этих же ВКС были выявлены потенциально перспективные в промышленном отношении проявления редких металлов и РЗЭ в щелочных

риолитах [Егоров и др., 2005; Волков и др., 2023; Grigorieva et al., 2024].

Месторождение Печальное расположено в 40 км к северу от пос. Оротукан Магаданской области, который находится на 392 км Колымской автомобильной трассы (рис. 2, врезка), берущей начало в г. Магадан. В 1980–1989 гг. на месторождении Печальное проводились поисковые и поисково-оценочные работы силами Сеймчанской ГРЭ, в результате которых прогнозные ресурсы месторождения по категории Р1 оценены в 4 т золота и 150 т серебра (Ячная и др., 1990¹).

Главная цель настоящей статьи — анализ новых минералого-геохимических данных, полученных в результате изучения эпитермальной Au–Ag минерализации месторождения Печальное, определение соотношения эпитермальной и РЗЭ минерализации; уточнение на этой основе модели рудообразования.

Следует отметить, что в данной работе впервые приведены результаты электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа рудных минералов, а также геохимического изучения эпитермальной минерализации методами рентген-флуоресцентного (РФА) и ICP-MS анализов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералогия руд изучалась в аншлифах на микроскопе AXIOPLAN Imaging. Химический состав определялся на электронно-зондовых микроанализаторах Camebax (аналитики Е.М. Горячева, Т.В. Субботникова) и QemScan (EVO50) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Quantax Esprit СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, (аналитик О.Т. Соцкая). Диагностика рудных минералов в комендитах выполнена на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (Япония) в центре коллективного пользования ИГЕМ РАН (аналитик Л.А. Иванова). Электронный микроскоп оснащен энергодисперсионным аналитическим спектрометром INCA-Energy 450 (Великобритания).

¹Ячная В.Д., Парака В.Н. и др. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на месторождении Печальное в бассейне р. Золотистая за 1988–1989 гг. Сеймчанская ГРЭ СВПО, п. Сеймчан, Магаданская обл., 1990. 582 с.

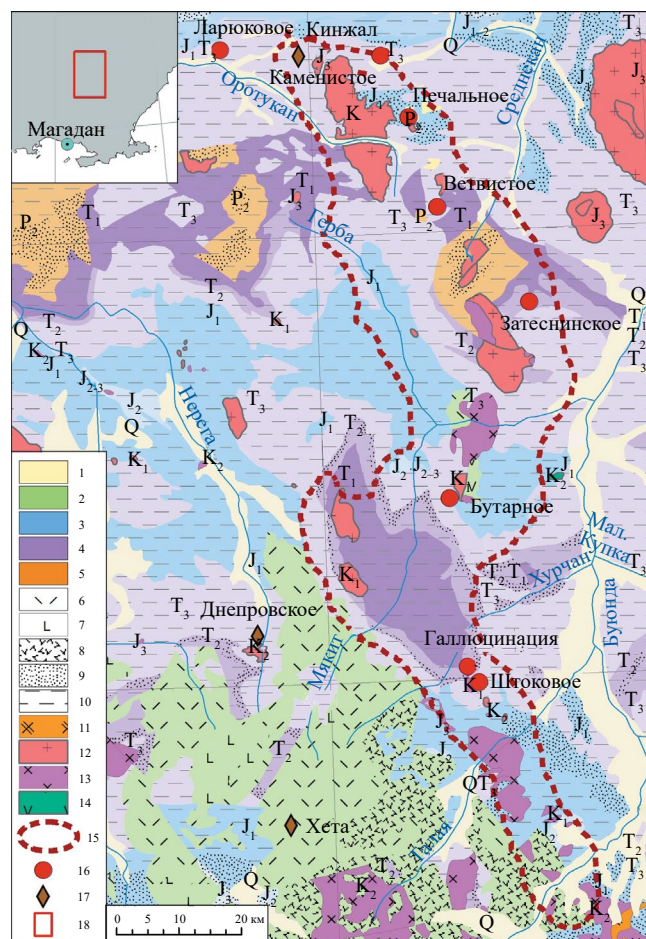


Рис. 1. Положение Печальнинской ВКС в Хурчан-Оротуканской зоне ТМА. Схема составлена на тектонической основе [Кузнецов и др., 1993] с дополнениями и упрощениями. 1–5 — геологические формации: 1 — четвертичные; 2 — меловые; 3 — юрские; 4 — триасовые, 5 — пермские; 6–8 — покровы и туфы меловых вулканитов; 9, 10 — песчаники и глинистые формации верхоянского комплекса; 11 — сиениты; 12 — гранитоиды; 13 — диориты и гранодиориты; 14 — малые интрузии габбро-диоритов; 15 — контуры ареала ТМА; 16 — месторождения: 16 — золота, 17 — оловорудные; 18 — контур карты.

В аналитическом центре коллективного пользования ИГЕМ РАН выполнено определение концентрации породообразующих и отдельных примесных элементов выполнено методом РФА на вакуумном спектрометре модель Axios mAX производства компании PANalytical (аналитик А.И. Якушев). Измерения микроэлементов (ICP-MS) проводили на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связанной плазме X-Series II (аналитик Я.В. Бычкова). Пределы обнаружения элементов составляли от 0.1 нг/г для тяжелых и средних по массе элементов с возрастанием до 1 нг/г для легких элементов. Золото в пробах определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на спектрометре Spectr AA220Z (аналитик В.А. Сычкова).

Для оценки условий формирования вулканогенного оруденения были определены геохимические показатели, а также отношения между элементами: ΣREE , ΣLREE , ΣHREE , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$, Y/Ho , U/Th , Eu/Eu^* и др. Кроме того, рассчитаны коэффициенты обогащения микроэлементами руд. Полученные значения сведены в таблицы, по которым построены графики распределения РЗЭ и других микроэлементов в рудах месторождений.

ПОЛОЖЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РЕГИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

В современном тектоническом плане Хурчан-Оротуканская зона ТМА (см. рис. 1) — это зона глубинного субмеридионального разлома [Кузнецов и др., 1993], пересекающая линейные складчатые структуры Иньяли-Дебинского синклинория и брахиформные структуры Балыгычано-Буяндинского поднятия на протяжении более 200 км. В ее пределах локализуются рудоносные ВКС (см. рис. 2), поля даек и субвулканических тел, рудные поля с Au–Ag, Au-редкометалльной, касситерит-силикатной, редкометалльно-пегматитовой и Ag-полиметаллической и РЗЭ минерализацией.

К месту пересечения Хурчан-Оротуканской зоны ТМА с переходной зоной между Иньяли-Дебинским синклинорием и Балыгычано-Буяндинским поднятием приурочена Верхне-Оротуканская интрузивно-купольная структура (см. рис. 2). В центральной части структуры (см. рис. 1) выходят на поверхность

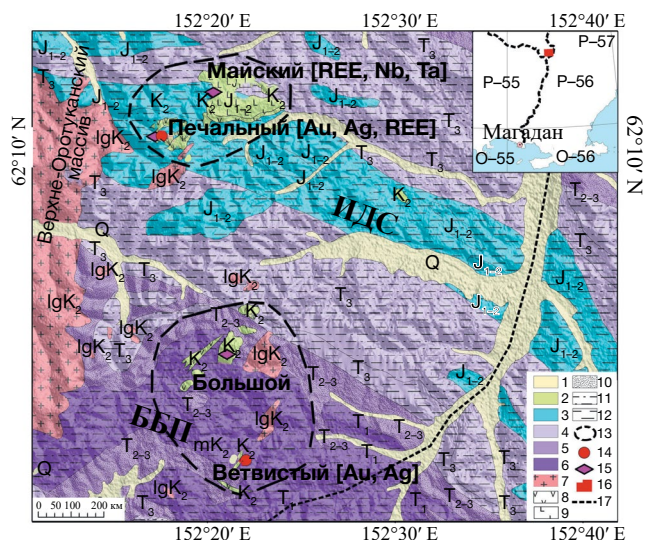


Рис. 2. Геологическая карта северной части Хурчан-Оротуканской металлогенической зоны с элементами рельефа по [Кузнецов и др., 2008] с изменениями.

1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — позднемиоценовые щелочные вулканиты; 3 — ранне-средне юрские черносланцевые толщи; 4–6 — терригенные толщи: 4 — поздне-триасовые, 5 — среднетриасовые, 6 — раннетриасовые; 7 — позднемиоценовые граниты, гранит-порфиры; 8 — трахириолиты, комендиты, 9 — трахибазальты; 10 — песчаники; 11 — алевролиты; 12 — аргиллиты; 13 — ограничение вулканоструктур; 14, 15 — рудопроявления: 14 — Au–Ag эпитеpмальные, 15 — редких металлов и РЗЭ; 16 — рамка карты, 17 — автодорога федерального значения “Колыма” и ее ответвление “Стрелка-Сеймчан”. ИДС — Иньяли-Дебинский синклинорий; ББП — Буяндино-Балыгычанское антиклинальное поднятие.

гранитоиды Верхне-Оротуканского массива позднемиоценового возраста (86 млн лет, K–Ag [Кузнецов и др., 2008]). Массив имеет многофазное строение и представляет собой в плане вытянутое в субмеридиональном направлении (24×8 км) тело овальной формы. В первую фазу сформировались средне и крупнозернистые биотит-роговообманковые субщелочные граниты, во вторую — мелкие штоки гранит-порфиров, аплитов и мелкозернистых гранитов.

Верхне-Оротуканский массив полого погружается на восток (углы падения 15–45°), а западный контакт массива — крутой (Кузнецов, 1991²). В надинтрузивной зоне массива развиты несколько

² Кузнецов В.М. Разработка критериев локального прогноза и обоснование оптимального направления геологоразведочных работ в пределах Хурчан-Оротуканской зоны на золотосеребряное и серебро-полиметаллическое оруденение // Отчет по теме № 1138 за 1988–1991 гг. Магадан, 1991. 180 с.

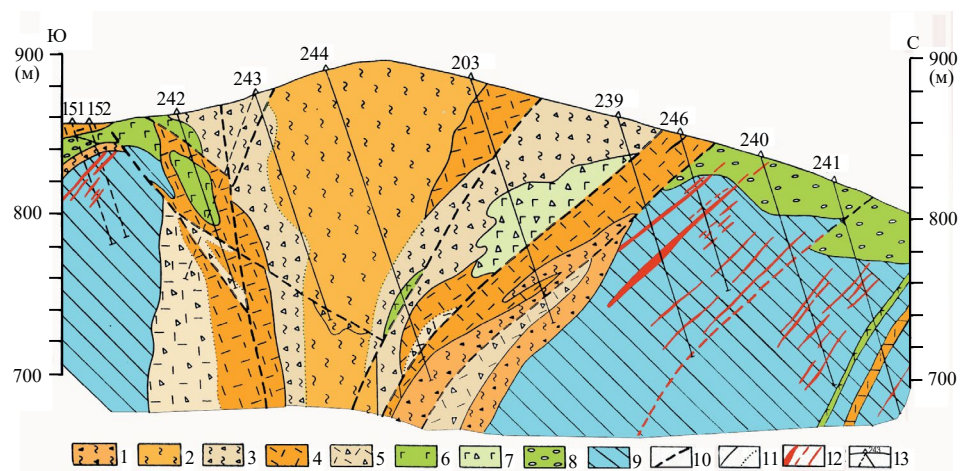


Рис. 3. Геологический разрез г. Риолитовой (месторождение Печальное) по буровому профилю по (Кузнецов, 1991²) с изменениями.

1 — эксплозивный брекчия II этапа; 2 — флюидалные риолиты, комендиты и их кластолавы; 3 — эруптивные брекчия флюидалных риалитов; 4 — массивные риолиты; 5 — эруптивные брекчия риолитов; 6 — базальты; 7 — туфы и туфоконглобрекчия базальтов; 8 — конгломераты низов печальнинской толщи; 9 — ороговикованные терригенные породы; 10 — разломы; 11 — границы: а — стратиграфические интрузивных подразделений, б — фациальных разновидностей; 12 — жилы и прожилки кварц-адулярового состава; 13 — скважины и их номера.

ВКС (см. рис. 2). В терригенном фундаменте последних локализованы рудные поля с Au—Ag и Ag-полиметаллической минерализацией Печальное, Ветвистое, а риолиты и комендиты, несут потенциально-промышленные концентрации РЗЭ.

Печальнинская ВКС находится на пересечении скрытого разлома северо-западного простирания и субширотного Ларюковского разлома, вдоль которого осуществлялись правосторонние и более поздние левосторонние сдвиговые перемещения вмещающих пород.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геологическое строение месторождения — двух ярусное (рис. 3): кварц-адуляровые и кварцевые Au—Ag жилы локализованы в ороговикованных терригенных породах нижнего яруса, а кварцевых риолиты и комендиты печальнинской толщи верхнего яруса содержат потенциально-промышленную редкометалльную и РЗЭ минерализацию [Егоров и др., 2005; Волков и др., 2023; Grigorieva et al., 2024]. Возраст кварц-адуляровых жил, определенный К—Ar методом 83 ± 4 млн лет (Кузнецов, 1991³).

³ Определение радиоизотопного возраста пород К—Ar методом выполнялось в лаборатории изотопной геохронологии и геохимии СВКНИИ ДВО РАН (аналитики А.Д. Люскин, К.К. Новик, Н.М. Александрова).

Блоковую структуру месторождения формируют разномасштабные субширотные, северо-западные и северо-восточные разломы. Наиболее древним, магмоконтролирующим и подводящим, вероятно, служил крупный разлом северо-западного простирания, проходящий через центральную часть месторождения. Ширина зоны разлома составляет около 0.5 км. Этот разлом, контролирующий положение ВКС и даек, выражен в резкой смене положительных и отрицательных магнитных полей.

Система разрывных нарушений (сбросов) северо-восточного и северо-западного простирания, формирующая ромбовидную блоковую структуру месторождения, рассматривается как серия трещин скалывания по отношению к зоне Ларюковского разлома. Ширина зоны разлома составляет около 2 км, она включает систему кулисообразно расположенных разрывных нарушений с преимущественным падением к югу под углами $65-80^\circ$, реже наклоненных к северу. При этом продуктивные жилы формировались в результате сдвиговых перемещений в этой зоне (Кузнецов, 1991²).

Предполагается, что система полого наклоненных ($10-30^\circ$) к востоку и северо-востоку разрывных нарушений, представленных зонами дробления и расщепления мощностью от 0.5 до 10 м, залегание которых обусловлена

морфологией погруженной кровли восточного фланга Верхне-Оротуканского интрузивного массива, контролирует размещение продуктивных жил (Кузнецов, 1991²).

Вмещающие породы

В составе нижнеюрской толщи преобладают кварц-полевошпатовые алевролиты и глинистые сланцы. Верхненорийские отложения встречаются локально на севере и юге рудного поля и представлены алевролитами с прослоями глинистых сланцев и вулканомиктовых песчаников с обломками эффузивов среднего состава. Терригенно-осадочные породы юры и триаса дислоцированы в узкие, складки субширотного простирания шириной 200–300 м, часто асимметричные или изоклинальные, иногда опрокинутые. Углы падения крыльев складок колеблются от 10° до 80°, в основном — 50–70°. Интенсивный метаморфизм осадочных пород вызван внедрением Верхне-Оротуканского массива и лучше всего прослеживается в глинистых сланцах и глинистых алевролитах. На контакте с выходами гранитов образовались биотит-кордиерит-кварцевые и биотит-кордиерит-кварц-калишпатовые роговики, на некотором удалении от контакта — узловатые сланцы, которые затем сменяются пятнистыми сланцами.

Печальнинская толща вулканитов, несогласно перекрывающая нижнеюрские отложения, в пределах ВКС образует субгоризонтальные покровы, или выполняет пологие мульды.

Нижняя песчано-конгломератовая пачка печальнинской толщи перекрывается покровами лав базальтов средней пачки и наиболее молодыми риолитами верхней пачки. Мощность нижней пачки непостоянна и колеблется от 1–2 м до 40–55 м. В тонкозернистых породах пачки содержатся отпечатки стеблей и обломки стволов деревьев. Предполагается, что отложения пачки представляют собой фацию вулканических предгорий — лахаровые, солифлюкционные и озерные отложения (Кузнецов, 1991²).

Средняя пачка сложена покровами андезито-базальтов и оливиновых базальтов, перекрывает песчано-конгломератовые отложения, иногда залегает непосредственно на дислоцированных нижнеюрских породах. Мощность

пачки варьирует от 10 до 170 м. По химическому составу породы пачки отвечают трахиандезито-базальтам [Егоров и др., 2005].

Верхняя риолитовая пачка залегает с небольшим перерывом на базальтах, реже на песчаниково-конгломератовой пачке. Покровные риолиты в центральной части ВКС сменяются экструзивными фациями, сложной флюидалности. Верхние горизонты покровов слагают массивные, иногда полосчатые риолиты и их кластолавы.

Риолитовая экструзия Печальнинской ВКС (см. рис. 3) формировалась в две фазы (Кузнецов, 1991²). Краевые части экструзии сложены риолитами и кластолавами первой фазы. На контакте с вмещающими осадочными породами распространены тела эруптивных брекчий первой фазы внедрения. Центральная часть экструзии сложена флюидалными риолитами, комендитами, их кластолавами и эруптивными брекчиями второй фазы внедрения (см. рис. 3). Установлена принадлежность этих пород к трахириолитам [Егоров и др., 2005]. Именно в последних были выявлены потенциально-промышленные концентрации РЗЭ [Волков и др., 2023].

Метасоматические породы месторождения можно отнести к трем формациям: грейзенам, вторичным кварцитам и пропилитами.

Грейзены связаны с выходами гранитоидов, дайками гранит-порфиров и риолитов, а также ороговикованных осадочных пород. В грейзенах и грейзенизированных породах размещаются жилы серого среднезернистого кварца с аллотриоморфнозернистой структурой, содержащие редкометалльную минерализацию.

Вторичные кварциты в пределах г. Риолитовой распределены в виде перевернутого конуса, в центральной части которого развита кварц-монтмориллонитовая и кварц-каолининовая фации, в пределах которых располагаются тела монокварцитов, мощностью 5–10 м и протяженностью до 50 м, приуроченные к зонам разломов. На периферии конуса во вмещающих терригенно-осадочных породах, ороговикованных и грейзенизированных, развиты метасоматиты кварц-серицит-гидрослюдистой фации, которые сменяются низкотемпературными пропилитами.

Кварц-адуляровые метасоматиты. На отдельных участках мелкозернистые агрегаты кварц-адуляровых метасоматитов замещают вышеперечисленные фации вторичных кварцитов. Кварц-адуляровые метасоматиты ассоциируют с продуктивными жилами того же состава.

Пропилиты развиты в базальтовой толще позднего мела-палеогена, в отложениях нижней юры на востоке участка, встречаются среди метасоматитов других формаций. По парагенезисам минералов выделяются средне- и низкотемпературные пропилиты.

Морфология рудных тел

Рудоносные жилы месторождения Печальное сформировались в два этапа (Кузнецов, 1991²). Первый этап связан со становлением интрузивов формации лейкократовых гранитов и комагматичных им даек позднего мела; второй — с формированием ВКС. Жилы I этапа — серого среднезернистого кварца, размещаются в грейзенах и грейзенизированных породах и сопровождаются минерализацией олова. Промышленное значение имеют кварцевые и кварц-адуляровые жилы II этапа с продуктивной Au—Ag минерализацией. Наиболее крупные жилы размещаются в краевой части ВКС в осадочных породах нижней юры, в пределах кварц-серицит-гидрослюдистой и отчасти кварц-монтмориллонитовой фации вторичных кварцитов. Преобладает субширотное простирание жил и падение на юг, под углами 50—75°. По мере удаления от риолитовой экструзии в плане и на глубину в жилах уменьшается количество адуляра, а колломорфно-полосчатые текстуры сменяются пятнистыми и массивными (Кузнецов, 1991²).

Продуктивные жилы объединены в 3 рудные зоны: северную, центральную и южную мощностью 350—400 м каждая (Кузнецов, 1991²), разделенные относительно безрудными интервалами шириной 250—300 м. Северная зона обладает наименьшей протяженностью и представлена свитой эшелонированных кварцевых и адуляр-кварцевых жил. Продуктивные жилы центральной зоны имеют преимущественно северо-восточное простирание и прослеживаются под отложениями печальнинской толщи. Здесь выделено пять рудных жил (№ 2, 3, 5, 10,

27) и мощная (до 6.8 м) гидротермально-метасоматическая кварцевая залежь, сформировавшаяся в плоскости отслоения на границе юрской толщи и вулканитов. Наиболее мощная и продуктивная южная зона, объединяет рудоносные жилы (№ 1, 4, 4а, 4б, 5), в которых сосредоточены основные запасы и ресурсы золота и серебра. Протяженность жил обычно не более 200—300 м, в единичных случаях 640 м (№ 5) и 840 м (№ 4). Мощность колеблется от 0.1 до 3 м, изредка до 6.2 м (№ 2). Жилы представляют собой серию линзовидных кулис с относительно небольшими смещениями, иногда расщепляются (№ 4) и сопровождаются оперяющими апофизами (№ 4а, 4б).

ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Преимущественным развитием в продуктивных жилах месторождения Печальное пользуются сочетание каркасно-пластинчатой и колломорфно-полосчатой, а также брекчиевая и брекчиево-друзовая текстуры (рис. 4). Кроме того, в жилах установлены сложные, комбинированные текстуры, которые представляет собой “композитные” образования. В разных участках таких жил, отношение количества кварца и обломков вмещающих пород изменяется от 1:10 до 10:1 и в более широких пределах. Местами в жилах распространены брекчии, в которых обломки представлены разновидностями кварца ранних генераций (см. рис. 4в), а цемент поздним метаколлоидным кварцем.

Комбинационные (композитные) текстуры. Для рудоносных жил Печального месторождения отмечены переходы от брекчиевой к пластинчато-каркасной и крустификационной текстур; местами наблюдаются элементы кокардовой, друзовой и гребенчатой текстур (см. рис. 4а).

Каркасно-пластинчатая текстура развита обычно в центральной части жил (см. рис. 4а), представленной субпараллельными удлиненными пластинчатыми агрегатами кварца, повернутыми относительно друг друга под углом 30° и до 60°, которые образуют каркасы в форме трех или четырех угольников. В строении каркасов может принимать участие и адуляр. Внутри каркасы выполнены агрегатами колломорфного кварца со следами

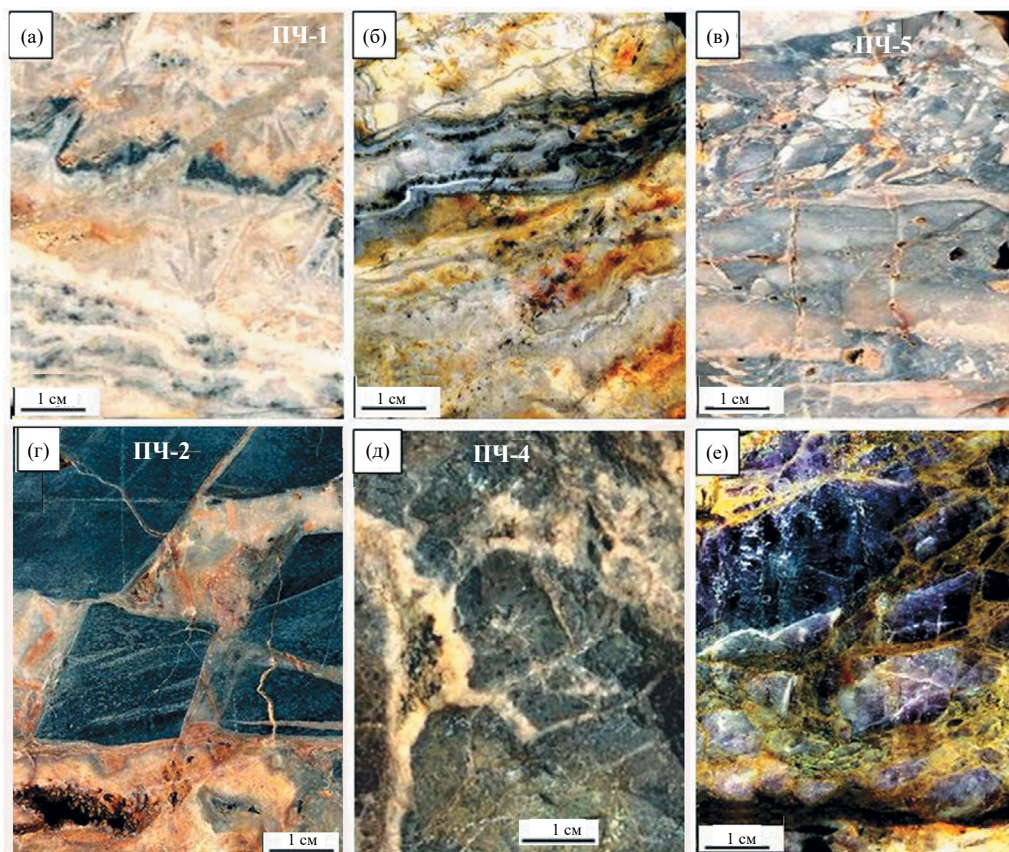


Рис. 4. Текстуры руд месторождения Печальное.

а, б — сочетание колломорфно-полосчатой и каркасно-пластинчатой текстур; в — брекчия с остроугольными обломками осветленного риолита; г — брекчия с обломками роговиков в кварцевом цементе и друзовой текстурой в занорышах; д — туффизит по В.М. Кузнецову (1991) с просечками карбоната; е — брекчия с крупными обломками флюорита в туффизитовой матрице. ПЧ-1 и др. соответствуют номерам в таблицах 3 и 4, а также местам отбора проб — ПЧ-1, траншея-701(В), ж-1, гор. 860 м; ПЧ-2, траншея-701(В), вмещающие породы, гор. 860 м; ПЧ-4, К-713, гор. 750 м; ПЧ-5, К-725(Ю), гор. 720 м.

раскристаллизации геля. Между повернутыми блоками пластин отмечаются полигональные пустоты. От стенок каркасов внутрь последних нарастают новообразованные кристаллы кварца, образуя друзовую текстуру. В каркасно-пластинчатой текстуре Печального месторождения, несмотря на структурированное пространство, халцедон начинает образовывать не только линейные, но и фестончатые полосы (см. рис. 4а, 4б). Жильный агрегат каркасно-пластинчатой текстуры редко содержит рудную минерализацию.

Колломорфно-полосчатая текстура связана с пульсационным характером поступления и кипением гидротермальных растворов. Она служит важным поисковым признаком рудных столбов (бонанц). Черными полоски, сложенные рудными минералами в такой текстуре, называют “гингуро” (см. рис. 4а, 4б).

Друзовые текстуры возникают в незаполненных пустотах, часто встречающихся в центральной части или зальбандах жил и между обломками в брекчиях (см. рис. 4г). На заключительных этапах рудообразования, на стенках таких пустот отлагаются хорошо образованные кристаллы кварца, карбоната, а в продуктивных жилах нередко и рудные минералы (блеклая руда, сульфиды, самородное серебро и/или самородное золото).

Брекчиевые текстуры. Жильные тела месторождения Печальное отличаются истинно брекчиевыми текстурами, для которых характерны остроугольность и непостоянство формы и размера обломков (см. рис. 4в, 4г, 4е), полностью заключенных в кварц-адуляровом, халцедоновом или туффизитовом цементе. Состав обломков часто не соответствует боковым вмещающим породам, поскольку перемещения тектонитов

могли быть довольно значительными, поэтому и происходило перемешивание раздробленного материала разных пластов и пород.

Наиболее ранние тела дорудных брекчий с остроугольными обломками ороговикованных осадочных пород расположены в обрамлении поля позднемеловых вулканитов, и представлены коленчато-разветвляющимися жильными телами (см. рис. 4г). К рудным брекчиям можно отнести брекчии с обломками темнофиолетового флюорита в карбонат-хлоритовом (туффизитовом) цементе (см. рис. 4е). Текстуры поздних (пострудных) брекчий отличаются присутствием обломков вулканического стекла, кварц-адуляровых метасоматитов и продуктивного колломорфно-полосчатого кварца (см. рис. 4г). Они, как правило, приурочены к центральной части месторождения и слагают жилообразные тела мощностью до 2 м, местами пересекая ранние брекчии. Пострудные брекчии отличаются присутствием в своем составе угловатых обломков (0.5–15 мм) аргиллитов, базальтов, осветленных риолитов, вулканического стекла, кварц-адуляровых метасоматитов и рудоносного кварца, погруженных в базальную (около 30% объема породы) туффизитовую матрицу. Туффизит по В.М. Кузнецову (1991²) образован темно-серым глинистым материалом, замещенным вторичным хлоритом, гидрослюдой или тонкозернистым

кварц-адуляровым агрегатом, пересеченным тонкими карбонатными прожилками (см. рис 4д).

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Для рудных минералов характерны мелкие выделения 0.5–0.05 мм, сосредоточенные в полосах халцедона, окрашенных рудной минерализацией в темный цвет, так называемых “гингуро”, мощность которых варьирует от долей мм до 0.5–1 см (см. рис. 4а, 4б). Количество рудных минералов в жилах не превышает 1–2%. В рудах насчитывается более 20 рудных минералов (табл. 1). Наиболее ранняя сульфидная минерализация представлена арсенопиритом, пиритом, марказитом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом и антимонитом. Продуктивную ассоциацию образуют самородное серебро, полибазит, высокоселенистый акантит и низкопробное самородное золота.

Жильные минералы

Кварц — основной жильный минерал и представлен тремя генерациями: кварц-I — мелко и среднезернистый, цементирует обломки ороговиков в ранних брекчиях, кварц-II — скрытокристаллический и халцедоновидный до халцедона, участвует в сложении ритмично полосчатых агрегатов, к которым приурочена

Таблица 1. Минеральный состав руд месторождения Печальное

Группы минералов	Главные	Второстепенные	Редкие
Жильные	Кварц Халцедон Флюорит Альбит Адуляр?	Карбонат Хлорит Серицит	Рутил
Рудные	Пирит Самородное серебро Ag-тетраэдрит Сфалерит Халькопирит Халькоцит Полибазит Акантит (Se до 16.8 мас. %)	Самородное Au Арсенопирит Маккинстриит Галенит Марказит	Гематит Стефанит? Аргиродит Гринокит?
Гипергенные	Гидроксиды Fe Акантит (гипергенный)	Хлораргирит	Англезит

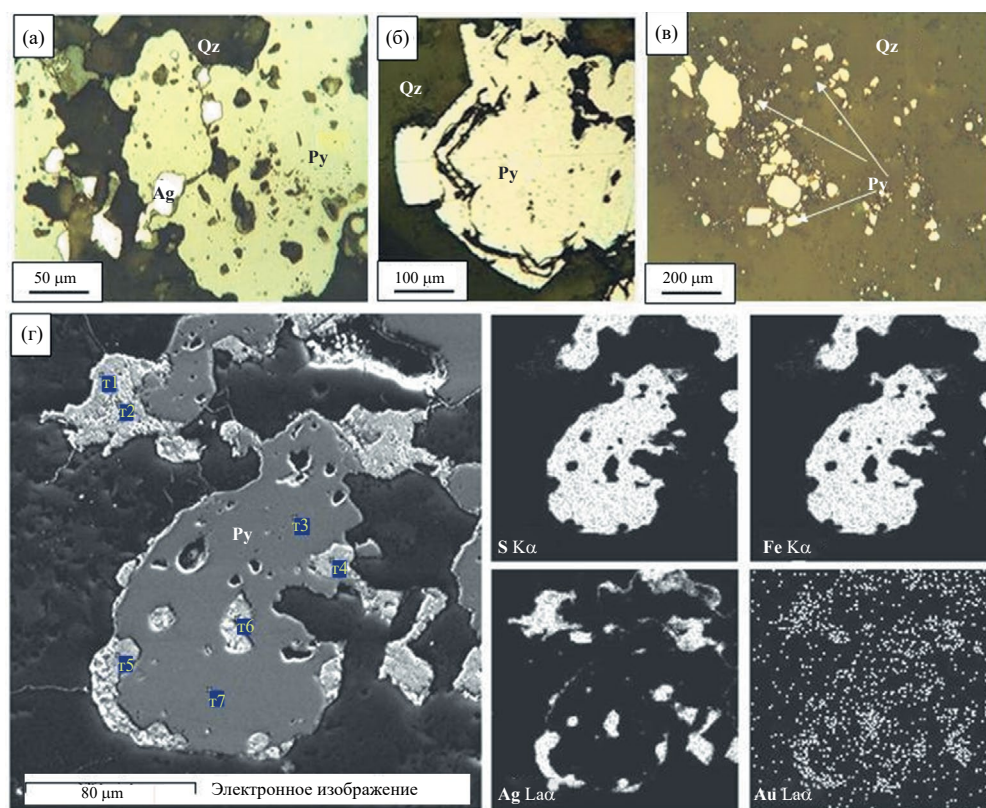


Рис. 5. Разновидности пирита в рудах месторождения Печальное.

а — гипидиоморфное выделение с включениями самородного серебра; б — идиоморфные кристаллы зонального сложения; в — тонко-вкрапленный пирит в метасоматите; г — ксеноморфное выделение пирита в сростании с самородным серебром (электронное изображение и распределение элементов в характеристическом излучении).

рудная минерализация; кварц-III — халцедоновидный слагает цемент пострудных брекчий.

Альбит — совместно с кварцем-I присутствует в ранних брекчиевых образованиях.

Адуляр — слагает отдельные ритмы мощностью до 2 мм совместно с кварцем-II и халцедоном в рудных жилах колломорфно-полосчатого строения.

Флюорит — встречается в виде крупных (до 3–5 см) обломков в карбонат-серицит-хлоритовом цементе. Цвет его темно-фиолетовый, характерный для разностей, содержащих в своем составе TR^{3+} , Eu^{2+} .

Рудные минералы

Пирит — широко распространенный рудный минерал, слагает гипидиоморфные и идиоморфные вкрапленники размером 0.2–0.8 мм в рудах и метасоматитах (рис. 5в). Нередко содержит каплевидные выделения золотистого (Au 3–5 мас. %) самородного серебра

(см. рис. 5а, 5г). На отдельных участках отмечается (см. рис. 5б) ступенчатый рост кристаллов пирита, указывающий на нестабильный режим рудообразования. По составу близок к стехиометрическому (табл. 2).

Сфалерит — образует ксеноморфные выделения в кварце, иногда развит в нем по микротрещинам (см. рис. 6а). Сфалерит сростается с галенитом (см. рис. 6в), самородным серебром (см. рис. 6а), с арсенопиритом (см. рис. 6д), а также с халькопиритом и акантитом (см. рис. 6е). Единичные анализы сфалерита показали в нем содержания железа от 5.57 до 6.9 мас. %

Галенит — встречается значительно реже сфалерита, в тесной ассоциации с последним, образует каймы 0.2–0.3 мм на сфалерите (аналитических данных нет).

Халькопирит — в небольших (0.5–0.3 мм) ксеноморфных выделениях наблюдается повсеместно и сростается с полибазитом, халькоцитом (см. рис. 6б), Ag-тетраэдритом, самородным

Таблица 2. Химический состав рудных минералов месторождения Печальное по данным микрорентгеноспектрального анализа

Концентрация элементов, мас. %						Формульные коэффициенты					
Пирит											
S	Fe					S	Fe				
54.25	45.75					2.02	0.979				
52.15	47.85					1.97	1.035				
53.19	46.81					1.99	1.007				
51.54	48.46					1.95	1.052				
Самородное золото											
Ag	Au										
76.34	23.66										
76.98	23.02										
63.80	36.20										
73.29	26.71										
57.72	42.28										
23.95	76.15										
62.61	37.39										
65.74	34.26										
67.80	32.20										
23.98	76.02										
70.15	29.85										
Каймы на низкопробном золоте (диффузия золота в гидроксиды железа)											
Ag	Au	Fe	As	O							
26.10	32.47	38.32	3.11								
19.14	24.87	29.57	2.40	24.02							
27.94	41.54	27.43	3.09								
19.07	29.80	19.94	2.21	28.98							
Акантит высокоселенистый Ag ₂ (S,Se)											
S	Se	Ag	Cu	Ge	Fe	S	Se	Ag	Cu	Ge	Fe
11.64	0	88.36				0.92	0	2.079			
6.38	16.89	76.74				0.53	0.57	1.898			
5.72	15.95	78.33				0.48	0.55	1.969			
14.88	13.84	68.27	3.06		2.01	1.05	0.4	1.438	0.109	0.020	0.382
13.08	1.27	81.83		0.54	1.82	1	0.04	1.861			0.201
6.81	13.29	82.39				0.56	0.44	2.002			
7.27	10.06	81.69				0.61	0.34	2.044			
7.44	13.80	79.20				0.61	0.46	1.930			
12.48	0.58	82.39			1.10	0.99	0.02	1.942			0.113

Таблица 2. Окончание

Концентрация элементов, мас. %						Формульные коэффициенты					
<i>Аргиродит $Ag_8Ge(S,Se)_6$</i>											
S	Se	Ag	Cu	Ge	Fe	S	Se	Ag	Cu	Ge	Fe
12.35	9.19	76.08	—	4.10		4.57	1.38	8.374		0.67	
<i>Маккинстриит $(Ag,Cu,Fe)_2(S,Se)$</i>											
S	Cu	Ag	Se	Fe		S	Cu	Ag	Se	Fe	
12.10	7.97	74.36	5.58			0.90	0.298	1.638	0.17		
13.66	8.95	70.77	6.63			0.98	0.323	1.506	0.19		
13.38	3.25	77.96		3.37		1.00	0.123	1.732	0	0.145	
<i>Халькопирит $CuFeS_2$</i>											
S	Fe	Cu				S	Fe	Cu			
35.19	30.55	34.26				2.01	1.002	0.988			
34.54	29.61	34.10				2.01	0.989	1.001			
34.59	28.85	33.73				2.03	0.972	0.999			
34.49	29.48	34.04				2.01	0.987	1.002			
34.63	29.26	34.13				2.02	0.979	1.003			

серебром, а также формирует зональные выделения с каймой халькоцита (см. рис. 6б, 6е), на внешнем контуре выделений халькопирита отмечаются тонкие гипергенные каймы акантита. По составу отвечает стехиометрии (см. табл. 2).

Полибазит — наиболее распространенный из минералов Ag, встречается в ксеноморфных выделениях, размером до 0.7 мм в кварце, сростается с самородным серебром (см. рис. 6г); характерный признак — эмульсия самородного серебра, как результат светотравления.

Самородное серебро — широко распространенный минерал в рудах, сростается со сфалеритом, пиритом, халькопиритом, образуя каймы и включения, нередко с идиоморфными очертаниями. В составе самородного серебра содержатся примеси Au до 3–5 мас. %.

Самородное золото — преимущественно низкопробное (250–300‰), единичное значение — 760‰ (см. табл. 2). В одном из выделений самородного золота в окисленном мышьяковистом пирите образуются экзотические диффузионные каймы, состоящие из Ag, O, Fe, As (рис. 7, см. табл. 2).

Акантит — распространенный минерал серебра в рудах, образует каймы на агрегатах халькопирита и сфалерита (см. рис. 6е), также встречаются мелкие включения в мышьяковистом пирите (см. рис. 7а), содержит высокую примесь селена (до 16‰, см. табл. 2). Высокоселенистый акантит характерен для эпиптермальных месторождений, локализованных в терригенных черносланцевых толщах, таких как — Роговик [Савва, 2005; Савва, 2018]. В гипергенном акантите, который образует ажурные выделения в окисленном пирите и тонкие каймы на халькопирите примесь селена отсутствует (см. табл. 2).

Следует отметить, что единичные, очень мелкие выделения акантита были обнаружены при изучении комендитов, содержащих РЗЭ минерализацию, на значительном удалении от рудных тел месторождения (рис. 8а). Включения акантита установлены в кристаллах титаномagnetита, который распространенных в породе (см. рис. 8а). Включения представляют собой скопления микрокристаллов акантита, размер которых находится в пределах 1–3 мкм (см. рис. 8б, 8в).

Кристаллы титаномagnetита, почти полностью замещены гидроксидами железа и обогащены кремнием и алюминием. Кроме серебра,

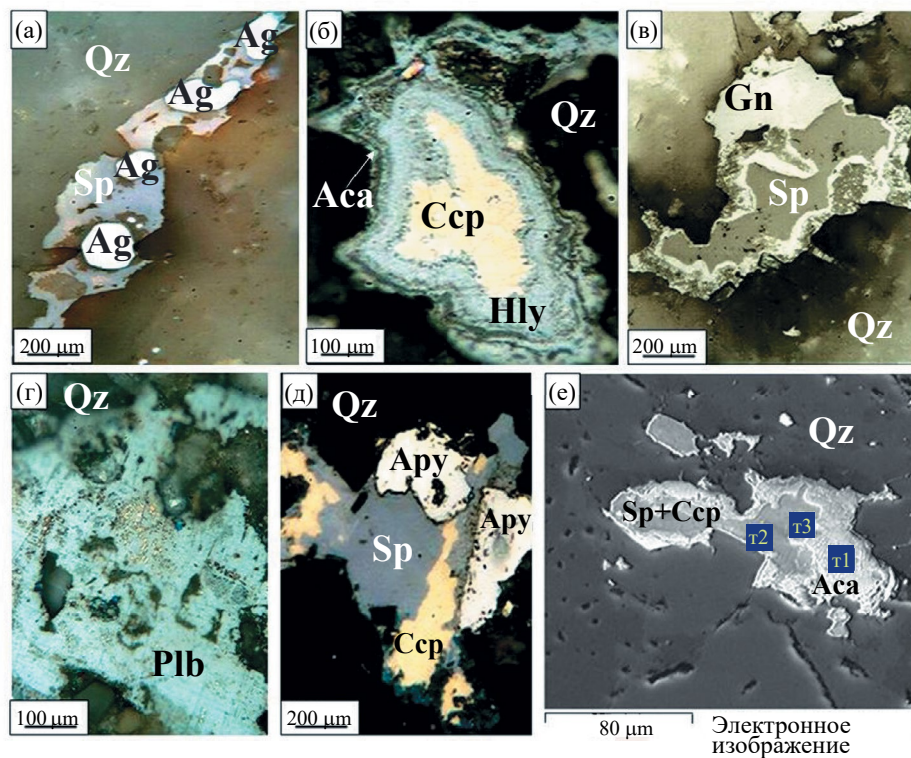


Рис. 6. Рудные минералы продуктивных кварц-адуляровых жил месторождения Печальное.

а — включения самородного серебра в сфалерите; б — выделение халькопирита с каймой арсенопирита (на внешнем обрамлении тонкая кайма безселенистого гипергенного акантита); в — срастание галенита со сфалеритом; г — выделение полибазита с характерными капельками самородного серебра; д — срастание сфалерита с халькопиритом и арсенопиритом; е — кайма акантита (светлое) на выделении халькопирита со сфалеритом (темное) (электронное изображение).

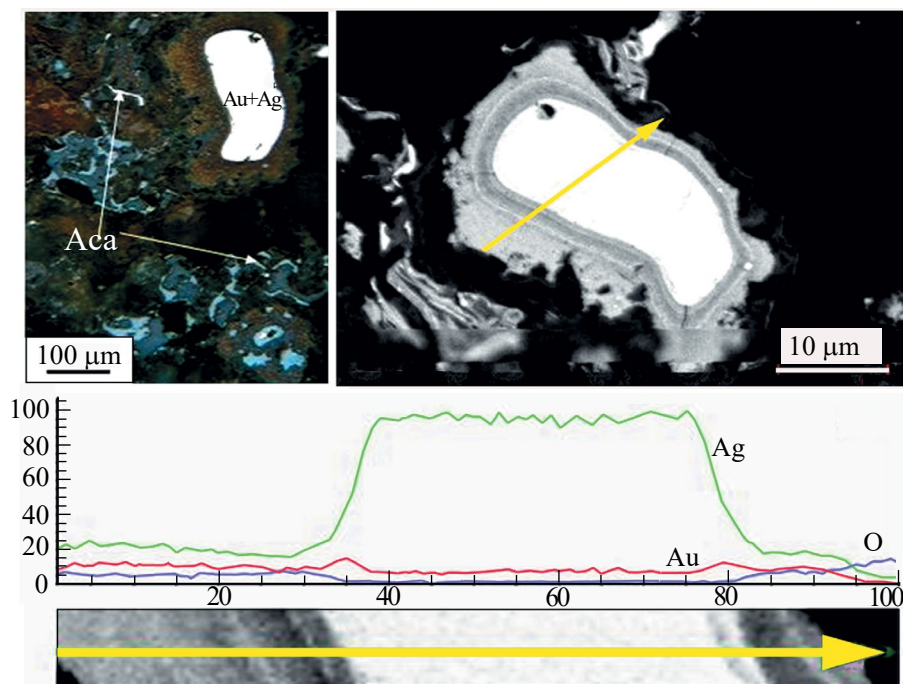


Рис. 7. Выделение самородного золота в окисленном мышьяковистом пирите, вокруг самородного золота диффузионная кайма. Кроме самородного золота, установлены выделения высоко селенистого акантита (слева — оптическое изображение, справа — электронное).

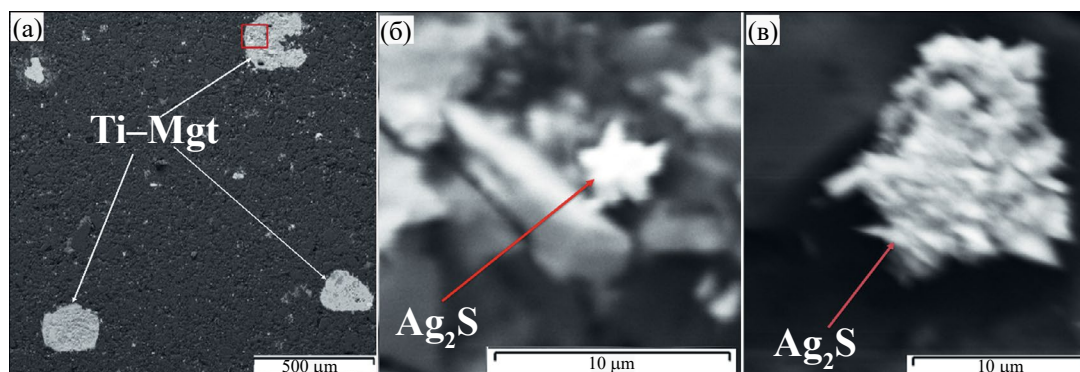


Рис. 8. Выделение акантита в комендитах месторождения Печальное.

а — порфиновые вкрапленники титаномagnetита (Ti–Mgt) в риолитах; б, в — выделение акантита в Ti–Mgt.

кристаллы титаномagnetита, по данным рентгеноспектрального анализа, обогащены Nb, Zn и Pb, причем, Nb входит в состав титаномagnetита, а Zn и Pb встречаются в титаномagnetите в виде сульфатов.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

В составе изученных образцов Au–Ag руд месторождения Печального преобладает SiO_2 (76.52–95.96%), присутствуют заметные концентрации Al_2O_3 (до 12.11%), $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ (0.23–4.93), K_2O (0.14–7.05) (табл. 3). Это говорит о том, что в составе рудных тел преобладает кварц, присутствуют в заметных количествах адуляры и

гидрослюда. Для руд характерны низкие и очень низкие значения Na_2O , CaO , MgO , TiO_2 , P_2O_5 и MnO (см. табл. 3). Судя по таблице, содержание сульфидов в изученных рудах небольшие ($S_{\text{общ}}$ — от 0.7 до 1.17%), что подтверждает убого сульфидный характер выявленной минерализации, типичный для руд эпитеpмальной золотосеребряной формации.

Au–Ag руды месторождения Печального (рис. 9) характеризуются явным обогащением довольно широким спектром элементов (по рейтингу): Ag, Au, As, Sb, Se, W, Tl, Li, Be, Bi, Cs, Mo, по сравнению со средними значениями верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан,

Таблица. 3. Химический состав Au–Ag руд месторождения Печального (в мас. %)

Компоненты	Номер пробы					
	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-4	ПЧ-5	ПЧ-6	ПЧ-7
SiO_2	83.68	80.88	80.95	95.96	97.55	76.52
TiO_2	0.02	0.35	0.49	0.02	0.01	0.64
Al_2O_3	8.7	9.9	10.4	1.7	0.21	12.11
Fe_2O_3	0.23	3.91	2.48	0.8	1.04	4.93
MnO	0.006	0.018	0.017	0.007	0.05	0.033
MgO	<0.10	0.66	0.58	0.11	<0.10	1.0
CaO	<0.10	<0.10	0.12	<0.10	0.17	0.14
Na_2O	0.18	0.23	0.15	0.1	<0.10	0.21
K_2O	7.05	3.04	3.09	0.81	0.14	3.02
P_2O_5	0.02	0.12	0.19	0.11	0.06	0.12
S	0.07	0.48	0.61	0.29	0.63	1.17
Σ	99.956	99.588	99.077	99.907	99.86	99.893

1988]. Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких раз (W, Tl, Li, Be, Bi) — до сотен (Sb, Se) и тысяч (Ag, Au, As) раз (см. рис. 9), что объясняется геохимическим родством ряда элементов и их синхронном участии в рудообразовании.

Отношение U/Th (табл. 4) в изученных рудах почти в 2 раза меньше, чем 0.75 (варьируют

от 0.02 до 0.42), что свидетельствует об окислительной среде их рудообразования [Jones, Manning, 1994].

Отношение Y/No изученных руд варьируют от 24.12 до 28.58 (см. табл. 4), что коррелирует с интервалом отношений характерных для современных гидротермальных флюидов задуговых бассейнов [Monecke et al., 2002].

Таблица 4. Элементный состав (г/т) Au–Ag руд месторождения Печального

№ пробы	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-4	ПЧ-5	ПЧ-6	ПЧ-7
Au	13.20	0.24	0.16	1.72	1.06	1.13
Ag	487.40	19.51	9.85	116.93	3.66	2.84
As	53.67	2356.05	7476.51	206.18	486.00	558.56
Sb	20.88	29.19	292.68	83.15	35.15	26.44
Cu	3.32	16.53	19.65	15.85	7.90	28.66
Pb	31.72	5.77	15.00	10.51	1.90	16.30
Zn	15.71	50.72	66.95	89.21	79.00	56.00
Li	155.11	204.84	149.01	148.08	98.19	157.06
Be	109.44	2.80	2.34	8.36	3.59	4.11
Sc	<0.1	2.05	1.13	<0.1	<0.1	6.94
V	<0.1	20.76	34.49	<0.1	<0.1	65.11
Cr	5.37	41.37	39.81	91.34	67.63	56.79
Co	0.26	<ПО	1.28	0.09	0.13	0.35
Bi	1.70	0.23	0.44	1.23	0.25	0.93
Ga	15.21	26.94	17.93	15.59	9.75	26.40
Rb	592.30	260.32	161.99	73.78	9.17	205.59
Sr	7.14	57.05	13.24	28.45	12.64	37.06
Y	0.31	11.86	8.23	0.73	0.06	15.52
Zr	1.99	57.93	82.84	2.67	0.36	120.51
Nb	<0.003	4.33	7.44	<0.003	<0.003	8.27
Mo	3.17	22.41	<0.018	0.16	0.90	<0.018
Sn	0.35	<ПО	<ПО	3.54	<ПО	<ПО
Cs	18.09	35.57	21.75	15.18	3.77	32.70
Ba	41.15	286.73	148.84	45.21	47.09	315.85
La	0.23	16.21	11.28	2.64	2.69	16.35
Ce	0.28	35.14	22.22	4.33	2.66	33.65
Pr	0.07	4.30	3.00	0.41	0.16	4.03
Nd	0.36	16.22	10.78	1.15	0.39	14.84
Sm	0.05	3.22	2.22	0.18	0.03	3.19
Eu	0.02	0.71	0.40	0.04	<ПО	0.70

Таблица 4. Окончание

№ пробы	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-4	ПЧ-5	ПЧ-6	ПЧ-7
Gd	0.04	2.79	1.70	0.07	<ПО	2.42
Tb	0.01	0.44	0.27	0.02	0.00	0.44
Dy	0.06	2.42	1.52	0.10	0.00	2.53
Ho	0.01	0.49	0.33	0.03	<0.0002	0.56
Er	0.03	1.32	0.92	0.07	0.01	1.87
Tm	0.00	0.17	0.13	0.01	<ПО	0.31
Yb	0.01	1.22	0.89	0.05	0.01	1.96
Lu	<ПО	0.16	0.13	0.01	<ПО	0.29
Hf	<0.003	1.58	2.51	<0.003	<0.003	3.37
Ta	<0.001	0.22	0.42	<0.001	<0.001	0.46
W	7.34	28.92	17.85	15.49	0.63	36.94
Tl	19.44	4.72	4.73	2.19	3.74	6.34
Th	<0.002	4.05	2.98	0.14	0.17	5.63
U	0.04	1.14	1.22	0.04	0.00	1.78
Σ REE	1.17	84.78	55.80	9.09	5.95	83.15
Σ LREE	1.01	75.79	49.91	8.75	5.93	72.77
Σ HREE	0.17	8.99	5.89	0.34	0.02	10.38
Σ LREE/ Σ HREE	6.05	8.43	8.47	25.54	254.62	7.01
Y/Ho	28.58	24.13	24.99	26.83	—	27.48
U/Th	—	0.28	0.41	0.25	0.02	0.32
Rb/Sr	82.91	4.56	12.24	2.59	0.72	5.55
Au/Ag	0.03	0.01	0.02	0.01	0.29	0.40
Eu/Eu*	1.09	0.80	0.71	0.85	—	0.80
Ce/Ce*	0.61	1.08	0.99	0.90	0.57	1.03
Σ Ce	0.94	71.86	47.28	8.53	5.90	68.88
Σ Y	0.19	10.06	6.45	0.43	0.04	9.85
Σ Sc	0.05	2.86	2.07	0.13	0.02	4.43
Eu/Sm	0.34	0.22	0.18	0.21	—	0.22

Примечание. Определение элементов и REE методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS), Аналитический центр коллективного пользования ИГЕМ РАН; ПО — предел обнаружения; REE — РЗЭ; LREE — легкие РЗЭ; HREE — тяжелые РЗЭ.

Легкие РЗЭ при повышении давления переходят в водный флюид, а тяжелые удерживаются в магме, что позволяет считать первые “гидрофильными”, а вторые “магмафильными” элементами [Жариков и др., 1999]. Кроме того, РЗЭ были

разделены на три группы: цериевые — La, Ce, Pr, Nd, иттриевые — Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, скандиевые — Er, Yb, Lu [Минеев, 1974]. Судя по табл. 4, в спектрах РЗЭ изученных руд преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы.

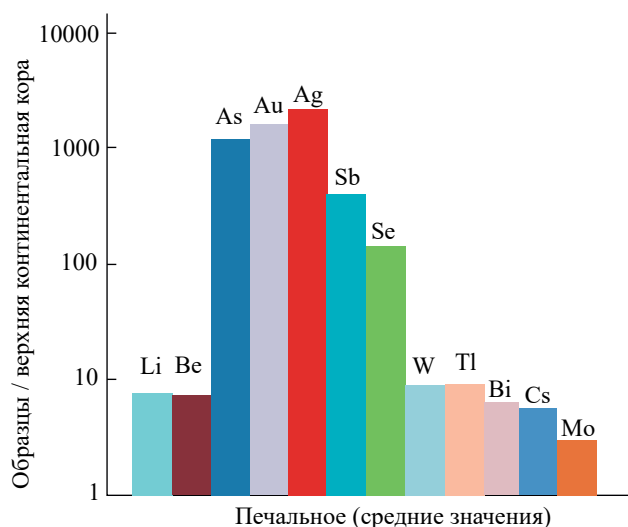


Рис. 9. Распределение основных микроэлементов в изученных образцах Au–Ag руд месторождения Печального, нормированных по отношению к средним значениям для верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. Среднее по 6 пробам (см. табл. 4).

Нормированные на хондрит РЗЭ эпитеpмальных руд образуют слабо наклонные близхондритовые спектры (рис. 10), во многом сходные по конфигурации со спектрами РЗЭ терригенных пород верхоянского комплекса [Михалицына, Соцкая, 2020] и характеризуются отсутствием Eu минимумов. Следовательно, можно предположить, что содержание РЗЭ в рудах унаследовано от вмещающие терригенные ороговикованные пород нижнего яруса ВКС.

В рудах месторождения Печальное Σ РЗЭ варьирует в широких пределах (от 1.17 до 84.78 г/т) (см. табл. 4). Такие интервалы значений суммы концентраций РЗЭ характерны для эпитеpмальных руд других месторождений ОЧВП с брекчиевыми текстурами [Волков и др., 2018].

В пробах из руд месторождения Печальное значения Eu/Eu^* и Ce/Ce^* — варьируют от отрицательных до слабopоложительных (см. табл. 4). Такое сочетание Eu/Eu^* и Ce/Ce^* также указывает на окислительные условия, существовавшие при рудоотложении [Горячев и др., 2008].

Низкие Eu/Sm отношения (<1) в изученных рудах (см. табл. 4) показывают, что рудообразование протекало на верхнекоровом уровне [Винокуров, 1996].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Месторождение Печальное вызывает значительный интерес, так как сформировалось в углеродистых терригенных толщах фундамента ВКС, на удалении около 200 км от ОЧВП. Терригенные толщи основания вулканоструктур принято считать неблагоприятной средой для локализации эпитеpмальной вулканогенной минерализации [Хельке, 1946; Шнейдерхен, 1958]. В частности, Г. Шнейдерхен [1958] полагал, что эпитеpмальные золотые и Au–Ag месторождения образуют отдельную группу и имеют свои особые корни в субвулканических интрузивах; переходы к мезотермальным плутоногенным месторождениям отрицались, указывалось на отсутствие эпитеpмальных руд вне связи с изверженными породами.

В сводке по Южно-Карпатской золотоносной провинции А. Хельке [1946] писал, что в черных средиземноморских сланцах, подстилающих вулканы, Au–Ag жилы выклиниваются, проникая в них на 50 м. Однако, в терригенных толщах залегают Au–Ag эпитеpмальные месторождения Высоковольное и Косманычи (Центральные Кызылкумы), Балеи и Тасеевка (Забайкалье), Промежуточное (Центральная Чукотка).

Богатейшее месторождение Хисикари (более 250 т золота, со средним содержанием 60 г/т) в Японии также залегает в терригенных толщах основания под покровом вулканитов [Izava et al., 1990]. В терригенных толщах также под экраном

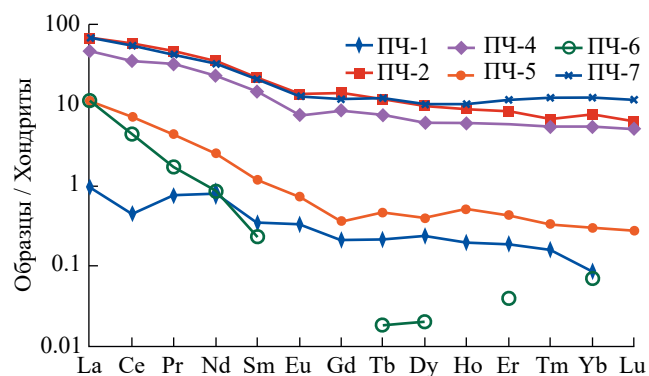


Рис. 10. Распределение РЗЭ, нормированных по хондритам [McDonough, Sun, 1995], в Au–Ag рудах месторождения Печального. Номера проб соответствуют табл. 3, 4.

вулканитов размещены продуктивные кварц-адуляровые жилы месторождения Печального. Однако, за исключением месторождений Балейского и Хисикари, все остальные относятся к небольшим по запасам объектам.

В настоящее время признана связь Au–Ag эпитеpмальных месторождений с островодужными и постаpккреционными вулканогенными поясами, с выполаживанием субдукции, рифтогенными структурами и постколлизийным задуговым растяжением [Richards, 2013]. С последней обстановкой связано формирование месторождения Печальное.

В общепринятой классификации [White, Hedenquist, 1995] эпитеpмальные месторождения на основании окислительного состояния серы в гидротермах разделены на два типа: низкосульфидизированный (LS — low sulphidation), высокосульфидизированный (HS — high sulphidation). Позднее был выделен еще один тип [Hedenquist et al., 2000] — промежуточносульфидизированный (IS — intermediate sulphidation). Для месторождений LS-типа обычно характерен [Hedenquist et al., 2000] пирит-пирротин-арсенопиритовый минеральный комплекс с железистым сфалеритом. В результате исследований установлены следующие минералогические особенности руд месторождения Печальное: невысокая сульфидность руд (1–2%); в качестве основных рудообразующих минералов выступают самородное серебро, низкопробное золото, полибазит, и высоко селенистый акантит, кроме того, в рудах достаточно широко развиты мышьяковистый пирит, арсенопирит, пирротин, железистый сфалерит, халькопирит и марказит.

Результаты геохимических исследований руд корреспондируют с минералогическими данными. Заметное обогащение эпитеpмальных руд довольно широким спектром микроэлементов (по рейтингу): Ag, Au, As, Sb, Se, W, Tl, Li, Be, Bi, Cs, Mo, преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, очень низкие Eu/Sm отношения ($\ll 1$), слабо наклонные близхондритовые спектры без европиевых минимумов или максимумов — типичны для эпитеpмальной рудообразующей системы месторождения Печальное. А соотношение значений Ce/Ce^* и Eu/Eu^* указывают на окислительные условия, преобладавшие при рудообразовании. Распределение

PЗЭ в эпитеpмальных рудах во многом сходные по конфигурации со спектрами PЗЭ вмещающих терригенных пород верхоянского комплекса [Михалицына, Соцкая, 2020].

В спектрах PЗЭ преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы. $\Sigma\text{PЗЭ}$ варьирует в широких пределах. Высокие значения $\Sigma\text{PЗЭ}$ характерны для брекчий, а низкие — для кварц-адуляровых жил. Следовательно, можно предположить, что содержание PЗЭ в рудах, зависит от количества обломков вмещающих терригенные ороговикованные пород нижнего яруса ВКС. Повышенные мышьяковистость и селенистость Au–Ag руд месторождения, весьма вероятно, унаследованы от обогащенных As и Se углеродистых терригенных вмещающих пород основания ВКС [Савва, 2005; Волков и др., 2006]. Полученные минералого-геохимические данные позволяют отнести минерализацию месторождения Печальное к селеновому подтипу низкосульфидизированного типа эпитеpмальных месторождений.

В результате проведенных исследований можно предложить следующую модель формирования месторождения Печальное. В продуктивный этап в связи со становлением Верхне-Оротуканского интрузива лейкократовых гранитов и комагматичных им даек и штоков позднего мела сформировались жилы серого среднезернистого кварца, которые размещаются в грейзенах и грейзенизированных породах и сопровождаются оловянной минерализацией. Эпитеpмальные Ag–Au жилы продуктивного этапа связаны с формированием вулканических пород базальт-риолитовой формации позднемелового возраста. К этому этапу относятся кварцевые и кварц-адуляровые Ag–Au жилы, тесно ассоциирующие с метасоматитами формации вторичных кварцитов.

В результате минералого-геохимических исследований можно предположить, что формирование Ag–Au минерализации произошло после внедрения риолитов первой фазы, которые экранируют продуктивные жилы и до внедрения флюидалых риолитов и комендитов второй фазы, содержащих редкометалльную и PЗЭ минерализацию. Такую последовательность подтверждают невысокие содержания PЗЭ в продуктивных жилах, а также отсутствие

сходства между спектрами РЗЭ в продуктивных жилах и в содержащих РЗЭ риолитах и комендитах [Волков и др., 2023].

Продуктивные жилы месторождения Печальное практически не эродированы, так как большая их часть локализовалась под экраном печальнинской толщи вулканитов. Глубина распространения рудной минерализации по аналогии с другими объектами (Хисикари) может превышать 200 м. Из минералогических признаков небольшого эрозионного среза следует отметить широкое развитие коломорфно-полосчатых текстур и адуляра в жилах, а также незначительное количество полиметаллической минерализации в рудах [Савва, 2018]. Слабая эродированность позволяет предположить высокую вероятность выявления не выходящих на поверхность рудных тел.

Полученные результаты могут быть использованы в региональных и локальных прогнозно-металлогенических построениях, поисках и оценке новых эпитеpmальных Au–Ag месторождений. Учитывая слабую изученность оперяющих зон ТМА Охотского сектора ОЧВП, в них высоки перспективы открытия новых эпитеpmальных Au–Ag и Ag месторождений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность геологу АО “Полиметалл УК” Сергею Федоровичу Петрову за предоставленную для исследований коллекцию образцов руд месторождения Печальное.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания ИГЕМ РАН (№ госрегистрации 124022400144-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их генетическое значение // ДАН. 1996. Т. 346. № 6. С. 792–795.

Волков А.В., Гончаров В.И., Сидоров А.А. Месторождения золота и серебра Чукотки. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. 221 с.

Волков А.В., Сидоров А.А., Прокофьев В.Ю., Савва Н.Е., Колова Е.Е., Мурашов К.Ю. Особенности эпитеpmального рудообразования Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (северо-восток России) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 3–22.

<https://doi.org/10.1134/S0203030618060093>

Волков А.В. Галямов А.Л., Мурашов К.Ю. Щелочные риолиты Печальнинского рудного поля (Северо-Восток России) — потенциальный большеобъемный источник тяжелых редкоземельных элементов // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 46–51.

<https://doi.org/10.31857/S2686739723600054>

Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.В. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (северо-восток России) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444.

Егоров В.Н., Жигалов С.В., Волков А.В., Сидоров А.А. О редкометалльном оруденении в трахириолитах и комендитах Хурчан-Оротуканской металлогенической зоны // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 237–242.

Жариков В.А., Горбачев Н.С., Латфутт П., Дохерти В. Распределение редкоземельных элементов и иттрия между флюидом и базальтовым расплавом при давлениях 1–12 кбар (по экспериментальным данным) // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 239–241.

Кузнецов В.М., Ницанский Г.М., Палымская З.А. Признаки проявления и формы выражения тектономагматической активизации на примере Хурчан-Оротуканской зоны // Колыма. 1993. № 7. С. 7–12.

Кузнецов В.М., Жигалов С.В., Ведерникова Т.А., Шпикерман В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 — Сеймчан. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 426 с.

Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 1974. 241 с.

Михалицына Т.И., Соцкая О.Т. Роль черносланцевых толщ в формировании золоторудных месторождений Наталка и Павлик (Яно-Колымский орогенный пояс) // Геология и геофизика. 2020. Т. 60. № 12. С. 1648–1671.

<https://doi.org/10.15372/GiG2020149>

Савва Н.Е. О возможном источнике селена в вулканических месторождениях // Наука Северо-Востока

- России — начало века / Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти академика К.В. Симанова и в честь его 70-летия (Магадан, 26–28 апреля 2005 г.). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2005. С. 208–210.
- Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с.
- Сидоров А.А. Золотосеребряная формация Восточно-Азиатских вулканогенных поясов. Магадан, 1978. 368 с.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
- Хельке А. Молодые вулканогенные золото-серебряные месторождения Карпатской дуги. М.: Изд-во Всесоюзной торговой палаты, 1946. 350 с.
- Шнейдерхен Г. Рудные месторождения. М.: Иностранная литература, 1958. 450 с.
- Grigorieva A.V., Volkov A.V., Sidorova N.V. REE Mineralization in Alkaline Rhyolites of the Pechalninskii Ore Field (Northeast Russia) // *Doklady Earth Sciences*. 2024.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24601469/>
- Hedenquist J.W., Arribas A., Gonzalez-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits. *Gold in 2000* // *Reviews in Economic Geology*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2000. P. 245–277.
- Izava E., Urashima Y., Ibaraki K. The Hishikari gold deposits: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanic of southern Kyushu, Japan // *Journal of Geochemical Exploration*. 1990. V. 36. P. 1–56.
- Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // *Chem. Geol.* 1994. V. 111. P. 111–129.
- McDonough W.F., Sun S.S. The Composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
- Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. P. 709–724.
- Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6. P. 911–916.
- White N., Hedenquist J. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration // *SEG News Letter*. 1995. № 23. P. 1–12.

Epithermal Au–Ag Mineralization in Terrigenous Strata of the Basement of the Pechalninsk Volcanic Dome Structure (North-East of Russia)

V. M. Kuznetsov^{1, *}, N. E. Savva^{2, **}, A. V. Volkov^{3, ***}, K. Yu. Murashov³,
A. L. Galyamov³, A. V. Grigorieva³

¹Karpinsky All-Russian Scientific Research Geological Institute,
Sredny prosp., 74, Saint Petersburg, 199106 Russia

²Shilo North-East Interdisciplinary Research Institute, FEB RAS,
Portovaya str., 16, Magadan, 685000 Russia

³Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: v_kuznetsov12@mail.ru

**e-mail: nsavva7803@mail.ru

***e-mail: tma2105@mail.ru

Epithermal Au–Ag mineralization of the Pechalnoe deposit is of considerable interest, since it was formed in carbonaceous terrigenous strata of the basement of a volcanic dome structure, at a distance of about 200 km from the border of the Okhotsk-Chukchi marginal continental volcanic belt. The geological structure of the Pechalnoe deposit is two-tiered: quartz-adularic and quartz Au–Ag veins are localized in keratinized terrigenous rocks of the lower tier, and quartz rhyolites and komendites of the Pechalninsky strata of the upper tier contain potentially industrial REE mineralization. Productive veins form three zones of sublatitudinal strike, the length of the veins in which is 200–300 m, sometimes 640, 840 m; average thickness 0.1–3 m, rarely up to 6.2 m, average contents: Ag — 266 g/t, Au — 4.4 g/t. The following mineralogical features of ores have been established: low sulfidity (1–2%); native Ag, low-grade Au, polybasite, and highly selenic acanthite act as productive minerals, in addition,

arsenic pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, ferruginous sphalerite, chalcopyrite and marcasite are quite widely developed in ores. The geochemical features of the ores are in good agreement with the mineral composition. The ores are enriched with a fairly wide range of trace elements (according to the rating): Ag, Au, As, Sb, Se, W, Tl, Li, Be, Bi, Cs, Mo, the predominance of light lanthanides over heavy ones has been established, very low Eu/Sm ratios ($\ll 1$), slightly inclined nearchondrite spectra (without distinct European minima or maxima); the ratio of Ce/Ce* and Eu/Eu* values indicate oxidative conditions during ore formation; the REE spectra are dominated by light “hydrophilic” lanthanides of the “cerium” group; the REE varies widely. The obtained mineralogical and geochemical data allow us to attribute the mineralization of the Pechalnoye deposit to the selenium subtype of the low-sulfidized class of epithermal deposits. According to geological and mineralogical-geochemical data, the deposit can be classified as poorly eroded, which makes it possible to predict the identification of new ore bodies that do not come to the surface.

Keywords: OChVB, volcanic dome structure, quartz-adular veins, ore textures, epithermal mineralization, mineralogical and geochemical features, gold, silver, model of formation