На правах рукописи



Жегунов Павел Сергеевич

МИНЕРАЛОГИЯ, ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЭВЕВПЕНТА (КАМЧАТКА)

Специальность: 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Петропавловск-Камчатский – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский

Научный руководитель:
Житова Елена Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией минералогии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский

Официальные оппоненты:
Толстых Надежда Дмитриевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Ванин Вадим Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией орогенеза Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск

Защита состоится **09 февраля 2027 года в 10:00 часов** на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 при Федеральном государственном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН)

Адрес: 664033 г. Иркутск, ул. Фаворского, стр. 1А.
e-mail: j.tarasova84@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГХ СО РАН, адрес сайта: http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita

Автореферат разослан « ___» декабря 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.053.01
к.г.-м.н. Ю.И. Тарасова

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Эпитермальные вулканогенные золото-серебряные месторождения служат важным источником благородных металлов и входят в число приоритетных объектов геологоразведочных работ для наращивания минерально-сырьевой базы рудного золота в Российской Федерации (Волков, Сидоров, 2013; Михайлов и др., 2014). Большой интерес к таким месторождениям объясняется их высокой рентабельностью, которая обеспечивается стабильным ростом цен на золото и легкообогатимыми рудами с высокими средними содержаниями металла (Волков, Сидоров, 2013). Учитывая появившийся в последнее время интерес и общую тенденцию к выявлению в основном маломасштабных месторождений, особенно в труднодоступных районах Северо-Востока России, возникает необходимость в проведении соответствующих фундаментальных исследований с целью их оценки и определения актуальных направлений развития поисков и разведки, технологий и техники добычи, переработки полезных ископаемых (Иванов и др., 2024; Постановление…, 2025).

Камчатка в этом отношении относится к числу наиболее перспективных и активно осваиваемых золоторудных провинций России (Бортников, Толстых, 2023). Для Камчатского края развитие горнодобывающей промышленности остается одним из главных стратегических направлений, однако ключевым сдерживающим фактором развития отрасли является недостаточная степень изученности минерально-сырьевой базы региона (Щепотьев и др., 2013ф; Правительство…, 2023). В связи с этим становится актуальной проблема переоценки известных и выявления новых золоторудных объектов, большая часть которых представлена разными по типу эпитермальными золото-серебряными месторождениями и рудопроявлениями. Этим определяются два главных направления исследований камчатских эпитермальных месторождений: фундаментальное (изучение генезиса благороднометалльного оруденения) и прикладное (расширение минерально-сырьевой базы края).

В настоящее время наиболее перспективным и слабо изученным в крае является Северо-Камчатский рудный район, расположенный в труднодоступной северной части полуострова. В его пределах известен ряд перспективных золоторудных объектов, в числе которых выделяется эпитермальное золото-серебряное рудопроявление Эвевпента, рекомендованное в качестве одного из первоочередных для проведения поисковых работ и дальнейшей оценки его промышленной значимости (Безрукова и др., 2004ф; Щепотьев и др., 2013ф). Успешные поисково-оценочные работы здесь могут привести к выявлению месторождения золота малого или среднего класса. Экономический потенциал рудопроявления Эвевпента дополнительно повышается благодаря относительной транспортной доступности, благоприятным горнотехническим условиям, близостью к районным логистическим центрам (п. Тымлат и Оссора) и побережью Берингова моря. Кроме того, наличие около 20 уже известных и обнаружение новых золоторудных объектов в районе исследования открывает перспективы для кластерной отработки. Подобный подход был успешно реализован на Агинском ГОКе (Центрально-Камчатский рудный район), для которого сырьевую базу составляют эпитермальные золото-серебряные месторождения Агинское, Бараньевское, Золотое, Оганчинское, Кунгурцевское и Южно-Агинское (Бортников, Толстых, 2023, стр. 727). Выбор рудопроявления Эвевпента в качестве объекта диссертационного исследования подкрепляется близким сходством его геологического строения, рудных минеральных ассоциаций и предполагаемой стадийности минералообразования с различными эпитермальными золото-серебряными

месторождениями Северо-Востока России: Асачинское, Родниковое, Агинское, Ирбычан, Дальнее, Кварцевая сопка, Купол, Ольча, Двойное, Кубака, Валунистое, Коррида и многие другие (Константинов и др., 2000; Савва и др., 2007, 2011, 2012; Кравцова, 2010; Волков и др., 2012, 2013а, 2020а, 2020б; Пальянова и др., 2016; Takahashi et al., 2002, 2007; Andreeva et al., 2013; Kolova et al., 2021; Tomson et al., 2022).

Однако, несмотря на перспективность, золото-серебряное рудопроявление Эвевпента остается недостаточно изученным. Предыдущими работами установлено его геологическое строение, тогда как минералогические особенности руд охарактеризованы лишь предварительно, в самых общих чертах (Казуров и др., 1994ф; Аррибас и др., 1999ф; Вартанян и др., 2000ф; Безрукова и др., 2004ф). До настоящего времени на рудопроявлении Эвевпента, как и на большинстве других эпитермальных золото-серебряных объектов Северо-Камчатского рудного района, не проводились детальные минералогические, изотопно-геохронологические и термобарогеохимические исследования с применением современных аналитических методов. В этой связи приобретает большую значимость проведение фундаментальных работ, включающих детальное изучение минералогических особенностей руд, реконструкцию последовательности минералообразования и флюидного режима. Это необходимо как для понимания условий формирования данного рудопроявления, так и для выявления общих закономерностей образования и локализации эпитермальных золоторудных объектов в регионе и как следствие их оценки.

Цель и задачи исследования. Основная цель – реконструкция последовательности минералообразования, установление особенностей флюидного режима рудообразующей системы, определение возраста руд и вмещающих магматических комплексов на эпитермальном золото-серебряном рудопроявлении Эвевпента. Основные задачи исследования:

1) комплексное изучение минерального состава руд, их структурно-текстурных особенностей, выявление минеральных форм нахождения золота и серебра, определение типоморфных свойств минералов и их взаимоотношений;

2) определение возраста формирования калиевополевошпат-кварцевых рудных жил и вмещающих субвулканических тел изотопно-геохронологическими методами;

3) определение параметров (температуры и состава) минералообразующих флюидов, сформировавших рудные калиевополевошпат-кварцевые жилы.

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора. В основу работы положен каменный материал, собранный автором при участии в поисковых работах на рудное золото на рудопроявлении Эвевпента, проводившихся Кичигинской партией АО «Северо-Восточное ПГО».

Полевые исследования включали поисковые маршруты масштаба 1:10 000 и документирование поисковых канав, сопровождавшиеся бороздовым, сколковым, задирковым и штуфным опробованием жильных тел, околорудно-измененных и неизмененных вмещающих пород. Всего для данного исследования автором отобрано около 120 образцов и проб горных пород и руд.

На *камеральном этапе* автором были выполнены пробоподготовка (распиловка образцов, дробление проб), гравитационное обогащение, выделение мономинеральных фракций акцессорных и породообразующих минералов, изготовление полированных препаратов. Под оптическим микроскопом изучено около 80 шлифов, 100 аншлифов и 11 прозрачно-полированных пластинок. При участии автора методом СЭМ–ЭДС исследованы морфология, минеральные взаимоотношения и химический состав рудных и жильных минералов, общее количество выполненных анализов составило около 4000 (ИВиС ДВО

РАН, аналитики С.В. Москалева, Ш.С. Кудаева, Е.Ю. Плутахина; Ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ, аналитик Н.С. Власенко). Автором изучено более 200 флюидных включений в кварце, микротермометрически охарактеризовано около 70 из них. Фазовый состав флюидных включений изучен автором методом КР-спектроскопии под руководством д.г.-м.н. С.З. Смирнова (ИГМ СО РАН). Уточнение степени упорядоченности Si–Al в структуре калиевого полевого шпата выполнено методом КР-спектроскопии (ИВиС ДВО РАН, аналитик М.А. Хохлова) и порошковой рентгеновской дифрактометрии (Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ, аналитик Р.М. Шевелева). Выполнено 7 определений абсолютного возраста изотопно-геохронологическими методами: возраст рудных жил определялся K–Ar методом по калиевому полевому шпату (ИГЕМ РАН, аналитик В.А. Лебедев); U–Pb датирование по циркону вмещающих пород производилось методом ЛА–ИСП–МС (КФУ, аналитик А.В. Куликова), а также на вторично-ионном микрозонде SHRIMP–II (Институт Карпинского, аналитик Е.Н. Лепехина). Автором также выполнены сбор и анализ фондовых материалов, после чего проведены обработка, анализ, интерпретация и обсуждение результатов исследования.

Научная новизна. Впервые для эпитермального золото-серебряного рудопроявления Эвевпента выполнены комплексные детальные минералогические исследования. Перечень минералов, образующих метасоматиты, руды и гипергенные ассоциации рудопроявления, существенно расширен. Среди гипогенных рудных минералов впервые для рудопроявления Эвевпента диагностированы: сфалерит, калаверит, акантит, алтаит, гессит, петцит, фазы состава $(Ag,Au)_{2-x}S$ (минералы ряда ютенбогардтит-петровскаит), киноварь, колорадоит, науманнит, йордизит, арсенопирит, аргентопирит. Установлены ранее не выявленные минеральные формы золота в рудах рудопроявления Эвевпента. Главной минеральной формой является самородное золото, распространенной – калаверит, в подчиненных количествах встречены петцит и сульфиды ряда ютенбогардтит–петровскаит. Наиболее распространенные минеральные формы серебра – акантит, гессит, петцит. Впервые выделены две минеральные ассоциации благородных металлов, соответствующие двум подстадиям рудообразования: золото-теллуридно-кварцевая и теллуридно-сульфидно-кварцевая с самородным золотом. Полученные новые данные о минеральном составе руд позволили отнести эпитермальное золото-серебряное рудопроявление Эвевпента к золото-теллуридному минеральному типу. Впервые изотопно-геохронологическими методами определен возраст рудных жил (K–Ar метод, по калиевому полевому шпату) и вмещающих субвулканических риодацитов (U–Pb метод, по циркону). На основании полученных данных и литературных источников выявлены возрастные соотношения между рудообразующими и магматическими процессами: показано, что формирование жил первой подстадии (от 11.7 ± 0.7 до 11.4 ± 0.4 млн лет) совпадает со становлением умуваямского вулканического комплекса, а второй подстадии (от 9.3 ± 0.3 до 8.7 ± 0.2 млн лет) – со становлением толятоваямского вулканического комплекса. Изучены параметры минералообразующих сред (температура, состав). Впервые установлено, что формирование рудных жил происходило при снижении температуры (от 338 до 183 °С) и солености флюидов ($T_{пл.}$ от –3.3 до –0.1 °С). На основе комплекса полученных данных реконструирована последовательность минералообразования.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Основные наработки автора вносят вклад в фундаментальные представления о генезисе эпитермальных золото-серебряных месторождений и позволяют уточнить и детализировать ранее предложенные обобщенные модели подобных объектов (Петренко, 1999; Константинов, 2000; Sillitoe, Hedenquist, 2003 и др.). В практическом отношении полученные данные могут быть

использованы при прогнозировании, поиске и оценке объектов-аналогов в регионе, что будет способствовать повышению эффективности поисково-оценочных и разведочных работ. Результаты исследования вошли в итоговый производственный отчет о поисковых работах на рудное золото в пределах рудного поля Эвевпента, при подготовке которого автор диссертации участвовал в составлении ряда разделов (Семериков и др., 2021ф).

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертации. Результаты исследования были представлены на 8 всероссийских и международных конференциях: XXIX Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2021), Российской молодежной научно-практической школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2021, 2022, 2023), ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (Петропавловск-Камчатский, 2022, 2024), Международной научной школе по наукам о Земле им. проф. Л.Л. Перчука (Петропавловск-Камчатский, 2022), годичном собрании Российского минералогического общества (Апатиты, 2024).

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 176 страниц состоит из введения, пяти глав и заключения, одного приложения, 59 рисунков, 24 таблиц и списка литературы из 246 наименований.

Во *введении* дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цели, задачи и защищаемые положения. В *первой главе* по литературным данным приведены общие сведения об эпитермальных золото-серебряных месторождениях, краткий обзор их изученности на Северо-Востоке России, а также рассмотрена история геологического исследования рудопроявления Эвевпента. Во *второй главе* описано геологическое строение района исследования. В *третьей главе* изложены результаты изотопного датирования рудных жил и вмещающих риодацитов, сформулировано первое защищаемое положение. В *четвертой главе* дана детальная характеристика минерального состава руд, их структурно-текстурных особенностей, рассмотрено структурное состояние калиевого полевого шпата из рудных жил, реконструирована последовательность минералообразования и сформулировано второе защищаемое положение. В *пятой главе* приведены результаты микротермометрического изучения флюидных включений в кварце рудных калиевополевошпат-кварцевых жил, обсуждаются составы минералообразующих сред и эволюция минералообразующих флюидов. В *заключении* подведены основные итоги исследования.

Благодарности. Работа выполнена под руководством кандидата геолого-минералогических наук Е.С. Житовой, которой автор выражает глубокую признательность за неоценимую помощь и поддержку. Автор искренне благодарен члену-корреспонденту РАН, доктору геолого-минералогических наук А.Ю. Озерову за всестороннюю помощь, поддержку и консультации по теме исследования. За ценные советы, практическую помощь, критические замечания и поддержку соискатель также хотел бы поблагодарить Л.П. Аникина, к.г.-м.н. Д.С. Буханову, д.г.-м.н. Е.В. Каневу, В.В. Куликова, Р.А. Кузнецова, А.Н. Купчиненко, к.г.-м.н. А.В. Кутырева, к.г.-м.н. А.С. Макшакова, С.В. Москалеву, А.С. Московского, к.г.-м.н. А.А. Нуждаева, д.г.-м.н. Г.А. Пальянову, чл.-корр. РАН, д.г.-м.н. И.В. Пекова, к.г.-м.н. Т.А. Радомскую, Л.А. Семерикова, д.г.-м.н. Е.Г. Сидорова, д.г.-м.н. С.З. Смирнова, Л.П. Федосенкову, М.А. Хохлову, к.г.-м.н. Е.О. Шапаренко, П.Е. Швейгерта, д.ф.-м.н. Р.Ю. Шендрика. За терпение, понимание и поддержку отдельные слова благодарности автор выражает жене Д.А. Кегель и маме Г.Е. Жегуновой.

Минералогические исследования, обработка и интерпретация данных, подготовка диссертационной работы выполнены по государственному заданию ИВиС ДВО РАН в рамках научно-исследовательской темы «Минералообразование в надсубдукционной зоне Северной Пацифики» (FWME-2024-0004, номер государственного учета 124031900001-9). КР-спектроскопические и термобарогеохимические исследования флюидных включений проведены в рамках темы научно-исследовательских работ ИГМ СО РАН «Мантийно-коровые флюидно-магматические системы в континентальной и островодужной литосфере, их эволюция и рудоносность (по флюидным и расплавным включениям в минералах и изотопно-геохимическим данным)» (FWZN–2022–0035, номер государственного учета 122041400312-2). КР-спектроскопические исследования минералов выполнены по теме научно-исследовательских работ ИВиС ДВО РАН «Геохимия продуктов современной вулканической и поствулканической деятельности» (FWME-2024-0013, номер государственного учета 124080600037-9). Запись порошковых рентгенограмм и проведение части СЭМ–ЭДС анализов осуществлены в Ресурсных Центрах «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета, финансирование которых осуществляется в рамках государственных заданий АААА-А19-119091190094 и 95439487 соответственно.

Краткая геологическая характеристика объекта исследования

Эпитермальное золото-серебряное рудопроявление Эвевпента располагается в северной части полуострова Камчатка, на левобережье реки Кичига, в 35 км к северу от поселка Тымлат (**рис. 1 а**). Оно входит в состав Северо-Камчатского рудного района, обладающего высоким потенциалом обнаружения месторождений золота и серебра эпитермального типа (Безрукова и др., 2004ф; Щепотьев и др., 2013ф). Рудопроявление Эвевпента приурочено к Галькальской вулкано-тектонической депрессионной структуре второго порядка, входящей в состав Центрально-Камчатского вулканогенного пояса. Расположение рудопроявления контролируется зоной пересечения Центрально-Камчатского глубинного разлома и субмеридионального Оссорско-Пновуваямского глубинного разлома третьего порядка.

В разрезе геологических образований выделяется три структурных яруса. Породы фундамента обнажаются в 1.5 км к юго-западу от рудопроявления и представлены кремнистыми алевролитами, аргиллитами и туфопесчаниками верхнемелового (сантон-кампан) ирунейского базальтового комплекса (на **рис. 1 б** не приведены). Эти породы прорываются интрузивным телом (штоком) миоценовых диоритов эмиваямского диорит-гранодиоритового плутонического комплекса. Средний структурный ярус сложен породами среднемиоценового умуваямского андезитового и позднемиоцен-плиоценового толятоваямского трахиандезит-дацит-андезитового вулканических комплексов (**рис. 1 б**). Вулканогенные образования комплексов слагают палеовулканическую постройку, имеют периклинальное залегание под углом 10–15° и обладают общей мощностью около 700 м. Они представлены субвулканическими телами андезитов и риодацитов, а также их эффузивно-пирокластическими эквивалентами (туфы, игнимбриты, потоки андезитов и андезибазальтов, туффиты, вулканокластические конгломераты). Верхний структурный ярус сложен рыхлыми четвертичными образованиями (пролювиальными, аллювиальными и ледниковыми отложениями).

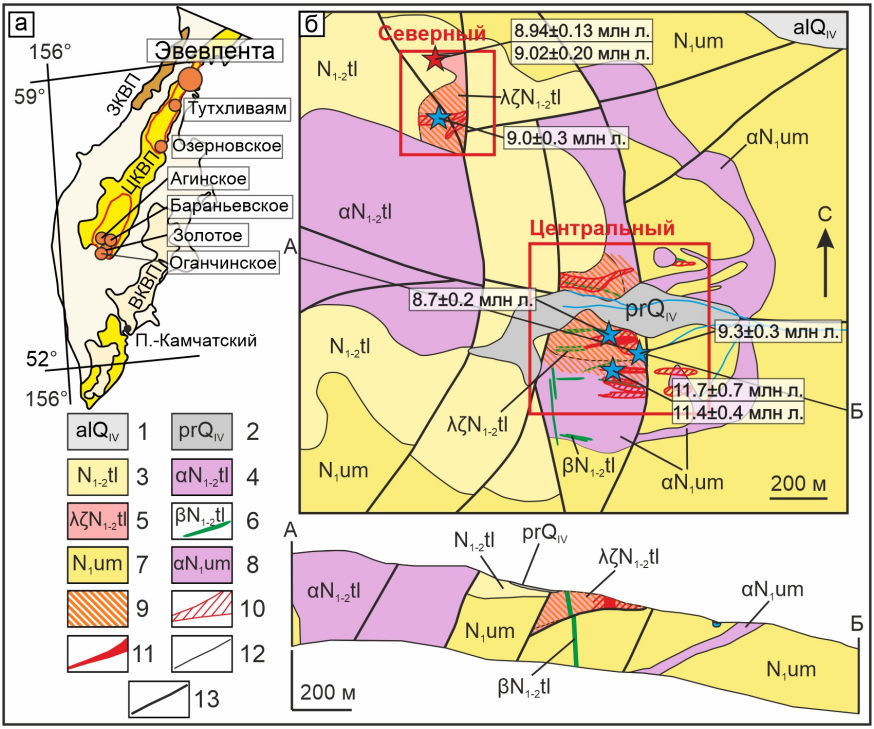


Рис. 1. Расположение основных эпитермальных золото-серебряных объектов в Центрально-Камчатском вулканогенном поясе (а) и схематическая карта геологического строения рудопроявления Эвевпента (б). На схеме (а) даны вулканогенные пояса Камчатки (Петренко, 1999): ЗКВП – Западно-Камчатский, ЦКВП – Центрально-Камчатский, ВКВП – Восточно-Камчатский. Красными контурами обозначены Центрально-Камчатский и Северо-Камчатский рудные районы.

На схеме (б) показаны геологическое строение рудопроявления Эвевпента и разрез по линии АБ (по Безруковой и др., 2004ф; Семерикову и др., 2021ф, с дополнениями и упрощениями автора). Условные обозначения: 1 – аллювиальные отложения; 2 – пролювиальные отложения; 3 – покровные образования толятоваямского вулканического комплекса; 4 – субвулканические андезиты толятоваямского комплекса; 5 – субвулканические дациты и риодациты толятоваямского комплекса; 6 – дайки базальтов толятоваямского комплекса; 7 – покровные образования умуваямского вулканического комплекса; 8 – субвулканические тела андезитов умуваямского комплекса; 9 – зоны аргиллизации и окварцевания; 10 – зоны кварцевого прожилкования; 11 – кварцевые жилы; 12 – границы геологических подразделений; 13 – разломы, выходящие на дневную поверхность. Синими звездами обозначены места отбора проб из калиевополевошпат-кварцевых рудных жил с указанием K–Ar возраста, красной звездой – место отбора пробы вмещающих риодацитов с указанием U–Pb возраста.

Золотоносные тела на рудопроявлении Эвевпента представлены жилами, жильными зонами, зонами прожилкования, а также телами гидротермальных брекчий кварцевого, калиевополевошпат-кварцевого состава (с карбонатами и гидрослюдами). Они обнаружены в пределах двух участков: Центральный и Северный (**рис. 1 б**). Жильные зоны локализуются в субвулканических телах андезитов умуваямского комплекса и риодацитах толятоваямского комплекса. Жилы и прожилки характеризуются значительным

морфологическим разнообразием: встречаются как одиночные жилы, так и сближенные, образующие зоны, пучки и группы. Мощность отдельных жил варьирует от <1 до 5 м, а их установленная протяженность составляет 150–300 м. Вмещающие породы аргиллизированы, в приконтактовой области вблизи рудных тел развиты кварцевые и калиевополевошпат-кварцевые (с гидрослюдами) метасоматиты, тогда как на удалении от рудных тел распространены пропилитизированные породы. Распределение благородных металлов в золотоносных телах крайне неравномерное: содержание золота по отдельным пробам колеблется от 1.6 до 81.2 г/т, содержания серебра низкие – от 0.1 г/т до 14.7 г/т (Безрукова и др., 2004ф; Семериков и др., 2021ф). В качестве элементов-спутников в рудах отмечены Pb, Cu, Zn, As, Sb (менее 1 %). На основании минерального состава руд рудопроявление Эвевпента было отнесено предшественниками к адуляр-серицитовому (*low-sulfidation*) типу эпитермальных золото-серебряных месторождений (Безрукова и др., 2004ф), что позднее было подтверждено нашими исследованиями (Жегунов и др., 2024б).

Основные защищаемые положения и их обоснование

Первое защищаемое положение. *По данным изотопного K–Ar датирования (по калиевому полевому шпату), возраст калиевополевошпат-кварцевых рудных жил рудопроявления Эвевпента составляет от 11.7 ± 0.7 до 8.7 ± 0.2 млн лет и соответствует периодам становления двух потенциально рудоносных вулканических комплексов. Выделено две подстадии рудообразования: (I) жилы возрастом от 11.7 ± 0.7 до 11.4 ± 0.4 млн лет, что согласуется с периодом становления умуваямского комплекса; (II) жилы возрастом от 9.3 ± 0.3 до 8.7 ± 0.2 млн лет, что согласуется с периодом становления толятоваямского комплекса.*

Для Северо-Камчатского рудного района, обладающего высоким ресурсным потенциалом, но остающегося слабо изученным, предыдущими работами была показана приуроченность эпитермальных золото-серебряных объектов к миоцен-плиоценовым вулканическим комплексам (Казуров и др., 1994ф; Безрукова и др., 2004ф; Сляднев и др., 2013). Однако эта связь требует дополнительного подтверждения, поскольку данные по изотопному возрасту руд эпитермальных золото-серебряных объектов в пределах рудного района отсутствуют. На рудопроявлении Эвевпента изотопное датирование руд ранее не проводилось, а существующие представления о возрасте жильных зон основаны на геологических взаимоотношениях с вмещающими вулканическими комплексами. В рамках данного исследования изотопно-геохронологическими методами изучены четыре пробы рудных калиевополевошпат-кварцевых жил (K–Ar метод по калиевому полевому шпату) и одна проба из субвулканического тела вмещающих риодацитов (U–Pb метод по циркону).

Из пробы риодацитов выделено более 100 зерен циркона. Исследованные цирконы представлены прозрачными кристаллами бледно-розового цвета, доминируют короткопризматические зерна, реже встречаются игольчатые. На катодолюминесцентных изображениях зерна обнаруживают тонкую ритмичную (осцилляторную) зональность, характерную для цирконов магматического происхождения, реликтовые ядра в зернах не обнаружены. Отношение Th/U (0.44 – 1.66) соответствует значениям, типичным для цирконов магматических пород кислого состава (Hoskin, Schaltegger, 2003; Xiang et al., 2011). Совокупность этих признаков свидетельствует о магматическом происхождении изученных кристаллов, а значит, полученные возрасты фиксируют момент кристаллизации расплава. Изотопное исследование первой группы цирконов методом ЛА–ИСП–МС дало конкордантный возраст 8.94 ± 0.13 млн лет (**рис. 2 а; см. рис. 1 б**), а датирование второй группы цирконов на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-II – 9.02 ± 0.20 млн лет

(**рис. 2 б; см. рис. 1 б**). Полученные разными методами средневзвешенные конкордантные значения возраста хорошо согласуются между собой и отвечают тортонскому веку позднемиоценовой эпохи неогена.

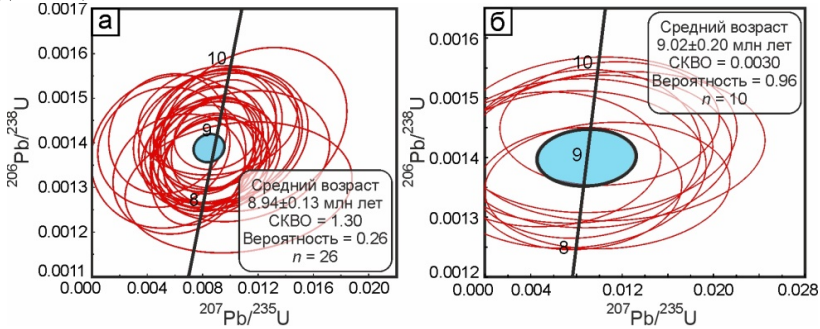


Рис. 2. Диаграммы с конкордией и средневзвешенные значения U–Pb возраста (а – полученные методом ЛА–ИСП–МС, б – методом SHRIMP–II) для цирконов из риодацитов рудопроявления Эвевпента.

Определение K–Ar изотопного возраста проводилось по участкам рудных калиевополевошпат-кварцевых жил, насыщенных калиевым полевым шпатом (валовые пробы). Калиевый полевой шпат в жилах находится в подчиненном количестве и рассеян среди зерен кварца, иногда формирует практически мономинеральные зоны и слои. Макроскопически он бесцветный и прозрачный, реже обладает желтовато-белой окраской. Калиевый полевой шпат в изученных образцах относится к моноклинной модификации, обладает низкой степенью Si–Al упорядочения, может быть отнесен к минеральному виду санидину и не подвержен значимым вторичным (посткристаллизационным) изменениям (Жегунов и др., 2026). Проведенное K–Ar изотопное датирование калиевого полевого шпата из рудных жил показало, что возраст рудопроявления Эвевпента находится в диапазоне от 11.7 ± 0.7 до 8.7 ± 0.2 млн лет (**табл. 1; см. рис. 1 б**).

Таблица 1

Результаты K–Ar изотопного датирования рудных калиевополевошпат-кварцевых жил рудопроявления Эвевпента

№ п/п	№ пробы	Калий, % ± σ	$^{40}Ar_{рад}$ (нг/г) ± σ	$^{40}Ar_{атм.}$, %	Возраст, млн лет ± 2σ
Участок Центральный					
1	101096–1	1.67 ± 0.05	1.367 ± 0.009	70.5	11.7 ± 0.7
	101096–2	1.34 ± 0.02	1.070 ± 0.010	78.2	11.4 ± 0.4
2	101151	6.11 ± 0.07	3.930 ± 0.060	50.0	9.3 ± 0.3
3	101168	3.83 ± 0.04	2.302 ± 0.009	48.9	8.7 ± 0.2
Участок Северный					
4	205015	1.25 ± 0.02	0.782 ± 0.005	45.9	9.0 ± 0.3

Для интерпретации новых геохронологических данных необходимо рассмотреть полученные датировки в контексте эволюции магматизма в районе исследования, основные черты которой приведены в работах (Боровцов и др., 1999ф; Сляднев и др., 2013). Наиболее ранними породами являются образования умуваямского андезитового вулканического комплекса (17.0 – 9.2 млн лет). За ними следует эмиваямский диорит-гранодиоритовый плутонический комплекс (12.5 – 8.0 млн лет), представленный штоком диоритов,

прорывающим породы верхнемелового фундамента на юго-западном фланге рудопроявления Эвевпента. Наиболее поздние образования – вулканиты толятоваямского трахиандезит-дацит-андезитового вулканического комплекса (10.0 – 3.0 млн лет). Распределение K–Ar изотопных возрастов перечисленных геологических подразделений, согласно литературным источникам, показано на **рис. 3**.

На основании полученных результатов можно утверждать, что рудные калиевополевошпат-кварцевые жилы рудопроявления Эвевпента сформированы в две *подстадии*: *первая* возрастом около 11.7 ± 0.7 – 11.4 ± 0.4 млн лет, а *вторая* – 9.3 ± 0.3 – 8.7 ± 0.2 млн лет (**рис. 3; см. табл. 1 и рис. 1 б**). Рудные жилы *первой подстадии*, вероятно, формировались синхронно времени становления умуваямского вулканического комплекса (**рис. 3**). В этот же временной интервал укладывается становление эмиваямского плутонического комплекса (**рис. 3**). Однако, учитывая дискуссионный характер генетической связи эпитермальных золото-серебряных месторождений адуляр-серицитового (*low-sulfidation*) типа с плутоническими комплексами, предположение о возможной парагенетической связи рудных жил с интрузивными телами требует дополнительного обоснования (Hedenquist, Lowenstern, 1994). Возраст рудных жил *второй подстадии*, напротив, в пределах погрешности хорошо сопоставим с возрастом вмещающих риодацитов (8.94 ± 0.13 – 9.02 ± 0.20 млн лет) и укладывается в интервал развития толятоваямского комплекса (**рис. 3**). Таким образом, на основании изотопных данных подтверждается временная связь процессов рудообразования со становлением миоцен-плиоценовых умуваямского и толятоваямского вулканических комплексов в Северо-Камчатском рудном районе и на рудопроявлении Эвевпента в частности.

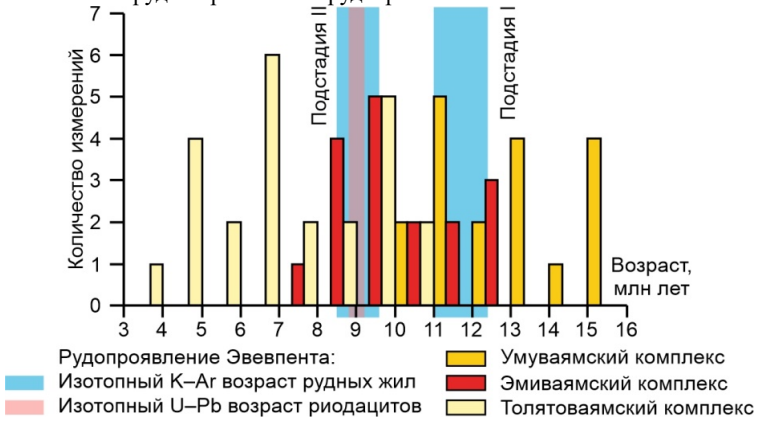


Рис. 3. Гистограмма распределения результатов изотопного датирования горных пород умуваямского и толятоваямского вулканических комплексов, а также эмиваямского плутонического комплекса Центрально-Камчатского вулканогенного пояса по данным (Боровцов и др., 1999ф; Федоров и др., 2025). Для сравнения показаны результаты изотопно-геохронологических исследований, полученные в данном исследовании.

В региональном контексте полученные изотопные датировки показывают, что формирование рудопроявления Эвевпента приходится на позднемиоценовый этап миоцен-плиоценовой металлогенической эпохи (**рис. 4**). Этот возрастной интервал соответствует времени развития большинства эпитермальных золото-серебряных объектов в Центрально-Камчатском вулканогенном поясе (Геодинамика…, 2006; Сляднев и др., 2013).

В заключение можно отметить, что вулканиты умуваямского и толятоваямского комплексов обладают сходными между собой геохимическими характеристиками, типичными для известково-щелочных серий надсубдукционных обстановок, и, считается, что их непрерывное формирование происходило в мелководных и субаэральных островодужных условиях (Геодинамика…, 2006; Сляднев и др., 2013; Федоров и др., 2022). Вулканическая островная дуга и соответствующая ей зона субдукции простирались от Курильских островов до южной части современного Корякского нагорья, и в неизменном тектоническом режиме функционировали с олигоцена до позднего миоцена (Геодинамика…, 2006; Lander, Shapiro, 2007; Сляднев и др., 2013). Таким образом, формирование рудопроявления Эвевпента связано с островодужным этапом развития Центрально-Камчатского вулканогенного пояса и согласуется с общепринятой моделью образования эпитермальных золото-серебряных месторождений адуляр-серицитового (*low-sulfidation*) типа в надсубдукционных обстановках в ассоциации с вулканогенными комплексами известково-щелочной серии (Константинов и др., 2000; Sillitoe, Hedenquist, 2003; John et al., 2020).

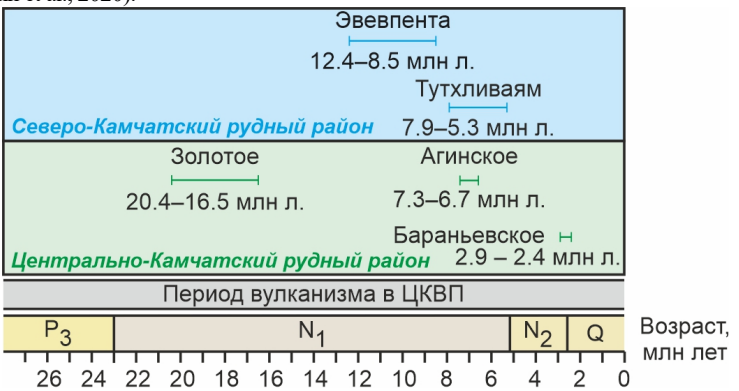


Рис. 4. Диаграмма возраста некоторых эпитермальных золото-серебряных месторождений адуляр-серицитового типа Центрально-Камчатского вулканогенного пояса (K–Ar метод, по калиевому полевому шпату из рудных жил). Возраст рудопроявления Эвевпента указан по данным настоящего исследования; рудопроявления Тутхливаям – по (Швейгерт и др., 2026); месторождений Центрально-Камчатского рудного района по (Большаков и др., 2010; Andreeva et al., 2013; Takahashi et al., 2013). ЦКВП – Центрально-Камчатский вулканогенный пояс.

Второе защищаемое положение. *В рудных калиевополевошпат-кварцевых жилах рудопроявления Эвевпента выявлены ранее неустановленные минеральные формы золота и серебра. Основными минералами золота являются очень мелкое самородное золото (пробность 505–989‰) и калаверит, менее распространены петцит и сульфиды ряда ютенбогардтит–петровскаит. Серебро присутствует преимущественно в виде акантита, гессита и петцита. Для рудных жил подстадии I характерна золото-теллуридно-кварцевая рудная ассоциация, а для жил подстадии II – теллуридно-сульфидно-кварцевая с самородным золотом. На основании минерального состава руд рудопроявление Эвевпента относится к золото-теллуридному минеральному типу эпитермальной (вулканогенной) золото-серебряной формации руд.*

Текстуры золотоносных жил на рудопроявлении Эвевпента разнообразные: колломорфно-полосчатая, каркасно-пластинчатая, брекчиевая с элементами кокардовой,

кавернозной, крустификационной, друзовой. Всего в рудах рудопроявления установлено около 40 минеральных видов (**табл. 2**). Жильные минералы представлены кварцем (85–95 %), калиевым полевым шпатом (до 10–15 %), карбонатами (кальцит, сидерит, родохрозит, до 5–10 %) и гидрослюдами (до 5 %). Руды убогосульфидные, содержание рудных минералов в жильных телах не превышает 1 %, а в участках обогащения < 10 %. Рудные минералы представлены сульфидами, теллуридами, хлоридами, селенидами и самородными элементами (**табл. 2**). В жильных телах рудные минералы, как правило, приурочены к полосам и участкам, обогащенным калиевым полевым шпатом. Размер зерен рудных минералов составляет от первых микрон до десятых долей миллиметра, пирит достигает 3–4 мм. Среди рудных микроструктур распространены микрозернистая и каемочная, а среди текстур – вкрапленная, пятнистая и неяснополосчатая.

На основании минеральных взаимоотношений, структурно-текстурных особенностей рудных жил, данных изотопного датирования, а также с учетом данных предшественников (Аррибас и др., 1999ф; Безрукова и др., 2004ф) и существующих геолого-генетических моделей эпитермальных месторождений Северо-Востока России (Петренко, 1999; Константинов и др., 2000; Кравцова, 2010), предложена последовательность минералообразования на рудопроявлении Эвевпента (**рис. 5**).

Таблица 2

Минеральный состав руд рудопроявления Эвевпента

Главные	Второстепенные	Редкие
Рудные минералы		
Пирит FeS_2	*Марказит FeS_2* Калаверит $AuTe_2$ *Самородное золото Au,Ag* *Халькопирит $CuFeS_2$* *Галенит PbS* Сфалерит ZnS Cd-содержащий сфалерит (Zn,Cd)S Акантит Ag_2S Алтаит PbTe Гессит Ag_2Te Петцит Ag_3AuTe_2	Фазы состава $(Ag,Au)_{2-x}S$ (минералы ряда ютенбогардтит-петровскаит) Киноварь HgS Колорадоит HgTe Науманнит Ag_2Se Самородное серебро Ag,Au Йордизит MoS_2 Арсенопирит FeAsS Борнит Cu_5FeS_4 *Ковеллин CuS* Хлораргирит AgCl Br-содержащий хлораргирит Ag(Cl,Br) Спионкопит $Cu_{39}S_{28}$ Аргентопирит* $AgFe_2S_3$
Нерудные минералы		
Кварц SiO_2	*Калиевый полевой шпат $KAlSi_3O_8$* *Кальцит $CaCO_3$* Родохрозит $MnCO_3$ Сидерит $FeCO_3$ *Пиролюзит MnO_2* Минералы группы гидрослюд (иллит) $K_{0.65}Al_2(Al_{0.65}Si_{3.35})_{\Sigma 4}O_{10}(OH)_2$ *Минералы систем Fe–O–OH и Mn–O–OH* Ярозит $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	Барит $BaSO_4$ Целестин $SrSO_4$ Англезит $PbSO_4$ Вульфенит $PbMoO_4$ Теллурит TeO_2 *Малахит $Cu_2(CO_3)(OH)_2$* *Церуссит $PbCO_3$* Минералы подгруппы каолинита $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Алунит* $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$

Примечание. Курсивом отмечены минералы, обнаруженные по результатам предыдущих исследований (Казуров и др., 1994ф; Вартанян и др., 2004ф). *Минералы, обнаруженные только в виде дочерних кристаллических фаз во флюидных включениях в кварце

На *дорудном этапе* сформировались пропилиты хлорит-карбонатной фации (с кварцем, калиевым полевым шпатом и цеолитами). В них отмечается рассеянная вкрапленность пирита, который замещает первичные фемические минералы и магнетит вулканогенных пород, фиксируются халькопирит и галенит.

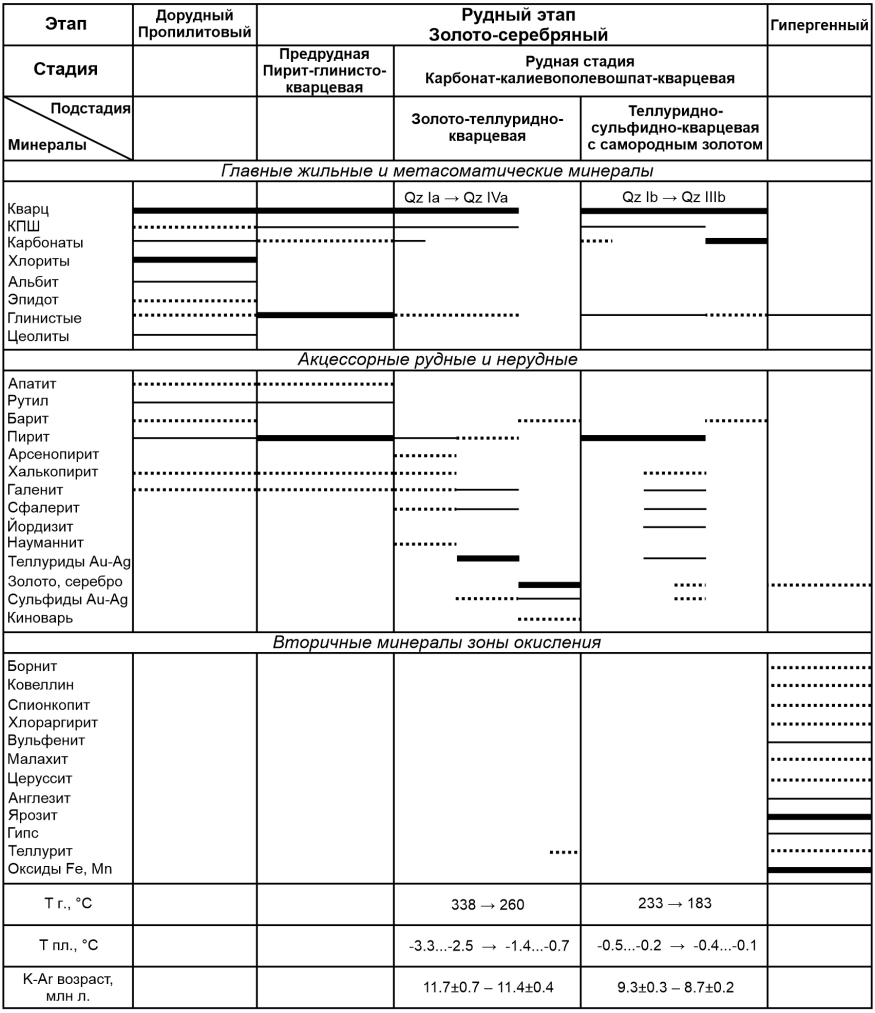


Рис. 5. Схема последовательности минералообразования на рудопроявлении Эвевпента. Толщина линий показывает распространенность минералов.

На *рудном этапе* в *предрудную стадию* формировались околотрещинные аргиллизиты гидрослюдисто-смектит-каолинит-кварцевого состава. Они приурочены к

кварцево-жильным зонам и образуют ореолы вокруг них. Аргиллизиты сложены глинистыми минералами (минералы группы гидрослюд и смектитов), содержат кварц, калиевый полевой шпат, карбонаты и рассеянную вкрапленность пирита, рутила, галенита и халькопирита.

В рамках *рудной стадии* выделено две подстадии: *золото-теллуридно-кварцевая (подстадия I,* возрастом 11.7 ± 0.7 – 11.4 ± 0.4 млн лет) *и теллуридно-сульфидно-кварцевая с самородным золотом (подстадия II,* возрастом 9.3 ± 0.3 – 8.7 ± 0.2 млн лет).

Золото-теллуридно-кварцевая подстадия, распространена на участке Центральный и представлена калиевополевошпат-кварцевыми жилами и зонами прожилкования, которые расположены в субвулканическом теле андезитов. Жилы подстадии содержат одноименную рудную минеральную ассоциацию. Большинство жил подстадии сложены калиевополевошпат-кварцевым агрегатом, обладающим пластинчатой или каркасно-пластинчатой текстурой, макроскопически формирующей параллельные или пересекающиеся пластины. В них можно выделить четыре последовательные генерации кварца: кварц первой (Ia), второй (IIa), третьей (IIIa) и четвертой (IVa) генерации. Ранний мелкозернистый кварц Ia совместно с калиевым полевым шпатом образует основной каркас жил, формируя пластины. Прозрачный мелкозернистый кварц IIa крустификационной текстуры обрастает пластины, а оставшееся пространство выполнено средне-крупнозернистым кварцем IIIa гребенчатой и друзовой текстуры. С данными генерациями кварца рудная минерализация практически не ассоциирует, отмечается небольшое количество пирита, который тяготеет к зальбандам. В этом пирите фиксируются включения акантита, алтаита и гессита.

Поздний халцедоновидный кварц IVa в ассоциации с калиевым полевым шпатом обрастает кварц более ранних генераций и выполняет остаточные полости. Он обладает колломорфно-полосчатой текстурой, в некоторых участках насыщен обильной вкрапленностью рудных минералов, образующих гнезда, пятна и прерывистые полосы черного цвета. В формировании рудных минералов также прослеживается определенная последовательность. Более ранние из них – алтаит, калаверит, гессит, Cd-содержащий сфалерит, колорадоит, галенит, петцит. Они располагаются в виде тонкодисперсной вкрапленности в кварце IVa, образуют скопления, занимают интерстициальное положение (**рис. 6 а**). Это указывает на их субсинхронное и более позднее образование по отношению к кварцу IVa. Наиболее распространены калаверит и алтаит, кроме того калаверит является одним из ведущих минералов золота в рудах на участке Центральный. Химические составы минералов системы Au–Ag–Te приведены на диаграмме (**рис. 7 а**).

Главная минеральная форма золота в рудах – самородное золото, образующее ассоциацию с теллуридами. На основе комплекса признаков (цвет, отражательная способность, морфология, внутреннее строение, пробность) выделены четыре разновидности самородного золота, обозначенные нами как самородное золото I, II III и IV соответственно. Высокопробное самородное золото I (801–976 ‰) и низкопробное самородное золото II (505–554 ‰), срастаются между собой и образуют идиоморфные дендритовидные зерна со сложными морфологией и внутренним строением (**рис. 6 б, в**). Размер зерен варьирует от первых единиц микрон до 150 мкм. Дендритовидные агрегаты самородного золота I и II, хотя и ассоциируют с теллуридами, однако непосредственных срастаний с ними не образуют. Самородное золото свободное, занимает интерстициальное положение в кварце, которое, вероятно, осталось незаполненным после кристаллизации более ранних рудных фаз. Это позволяет предполагать более позднее формирование самородного золота по отношению к теллуридам. Краевые зоны дендритовидных зерен

корродируются сульфидами Au–Ag (**рис. 6 в, г**). Составы этих сульфидов занимают промежуточное положение между петровскаитом и ютенбогардтитом и могу быть описаны общей формулой $(Ag,Au)_{2-x}S$ (**см. рис. 7 б**). В изученных образцах также встречается акантит, который образует как самостоятельные зерна, так и каймы по галениту и сфалериту, иногда совместно с киноварью. Эти признаки указывают на наиболее позднее формирование сульфидов Au–Ag по отношению к сульфидам цветных металлов, теллуридам и самородному золоту.

Завершался процесс формированием весьма высокопробного «горчичного» самородного золота III (906–989 ‰). Оно формирует ксеноморфные угловатые и комковидные зерна размером от единиц микрон до 200 мкм. Для него характерна низкая отражательная способность, хрупкость, пористость и неоднородное внутреннее строение (**рис. 6 г**). В химическом составе кроме Au и Ag присутствуют примеси O, Fe, S, Te, Mn. Широкий спектр примесей в «горчичном» золоте обусловлен присутствием в нем минеральных микровключений – преимущественно гипергенных минералов систем Fe–O–OH и Mn–O–OH, а в отдельных случаях хлораргирита и кварца (Жегунов и др., 2024а). В парагенезисе с теллуритом оно образуется в результате псевдоморфного замещения калаверита (**рис. 6 д**).

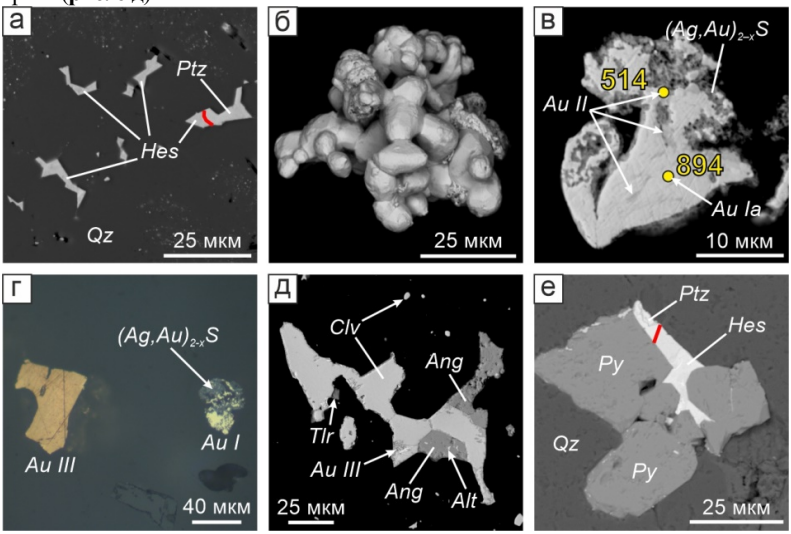


Рис. 6. Минеральные ассоциации, морфологические особенности и внутреннее строение минералов благородных металлов рудопроявления Эвевпента: а – угловатые ксеноморфные зерна гессита и петцита, а также тонкая «эмульсионная» вкрапленность этих же и других теллуридов (белые точки) в кварце; б – зерно самородного золота дендритовидной формы (агрегат округлых и слабо ограненных кристаллов); в – зерно самородного золота неоднородного внутреннего строения, в котором различные участки сложены самородным золотом I и II, а каймы – фазами $(Ag,Au)_{2-x}S$; г – зерно самородного золота I в срастании с фазами $(Ag,Au)_{2-x}S$ и зерно «горчичного» самородного золота III; д – теллурит и «горчичное» самородное золото III, замещающие калаверит, а также англезит, замещающий алтаит; е – гессит и петцит в срастании с пиритом. Изображения в обратно-рассеянных электронах (а, в, д, е), изображение во вторичных электронах (б) и фото в отраженном свете (г). *Ptz* – петцит, *Hes* – гессит, *$(Ag,Au)_{2-x}S$* – минералы ряда ютенбогардтит-петровскаит, *Clv* – калаверит, *Tlr* – теллурит, *Ang* – англезит, *Alt* – алтаит, *Py* – пирит, *Qz* – кварц, *Au I*, *Au II*, *Au III* – самородное золото первой, второй и третьей разновидности соответственно.

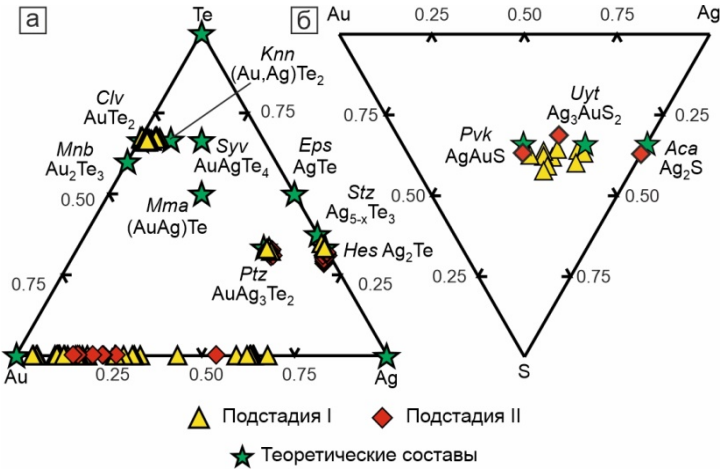


Рис 7. Диаграммы составов минералов Au–Ag (в ат. %): а – минералы системы Au–Ag–Te; б – минералы системы Au–Ag–S. *Knn* – креннерит, *Clv* – калаверит, *Mnb* – монтбреит, *Syv* – сильванит, *Eps* – эмпрессит, *Mma* – мутманнит, *Stz* – штютцит, *Ptz* – петцит, *Hes* – гессит, *Uyt* – ютенбогардтит, *Pvk* – петровскаит, *Aca* – акантит.

Теллуридно-сульфидно-кварцевая с самородным золотом подстадия приурочена к субвулканическим телам риодацитов. Жилы подстадии содержат одноименную рудную минеральную ассоциацию. Она представлена кварцевыми жилами, зонами прожилкования и телами гидротермальных брекчий. На участке Северный преобладают жилы и прожилки, обладающие колломорфно-полосчатой с элементами крустификационной текстурой. В них выделяются три последовательные генерации кварца: кварц первой (Ib), второй (IIb) и третьей (IIIb) генерации.

Ранний микрозернистый кварц Ib слагает призальбандовые части жил и прожилков, содержит рассеянные кристаллы калиевого полевого шпата с подчиненной вкрапленностью пирита.

Он сменяется мелкозернистым кварцем IIb с прослоями халцедона и обильной вкрапленностью гидрослюд. Кварц IIb содержит рассеянную вкрапленность сульфидов (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, йордизит), которые располагаются в виде включений в этом кварце и в интерстициях между его зернами. Наиболее распространенные минералы золота и серебра – петцит, гессит и акантит, их составы приведены на диаграмме (**рис. 7 а, б**). Обычно они срастаются с пиритом или находятся в виде включений в нем, по отношению к которому они ксеноморфны, что свидетельствует об их более поздней кристаллизации (**рис. 6 е**). Самородное золото встречается редко, выделено две его разновидности: высокопробное самородное золото I (832–909 ‰) и низкопробное самородное золото II (608 ‰). Обе разновидности встречаются совместно и образуют идиоморфные зерна дендритовидной формы (агрегаты слабо ограненных кристаллов) размером от нескольких микрон до 100–120 мкм. В краевых зонах дендритовидных агрегатов самородное золото корродируется минералами ряда ютенбогардтит–петровскаит, их химические составы показаны на диаграмме (**рис. 7 б**).

Центральные части жил и прожилков выполнены мелко-среднезернистым калиевым полевым шпатом и крупнозернистым прозрачным кварцем IIIb, обладающим

гребенчатой и друзовой текстурой. Поздние карбонаты (сидерит, кальцит, родохрозит) образуют гнезда в центральных частях прожилков. В отдельных случаях карбонаты цементируют кварц более ранних генераций, иногда формируют самостоятельные маломощные прожилки. Для карбонатов также характерна последовательность формирования: от железистых (сидерит) через марганцевые (Zn-содержащий родохрозит) к кальциту, который замыкает этот ряд. Поздний кварц IIIb и карбонаты не содержат парагенетически связанных с ними рудных минералов.

На *гипергенном этапе* в зоне окисления рудопроявления формировались минералы подгруппы каолинита (за счет калиевого полевого шпата), англезит, ярозит, вульфенит, минералы системы Fe–O–OH (за счет сульфидов), гипс и минералы системы Mn–O–OH (за счет карбонатов). С этим этапом связана рудная минерализация: формировались ковеллин, борнит, спионкопит (по халькопириту) и хлораргирит (по минералам серебра). В гидроксидах железа и ярозите, замещающих пирит, иногда фиксируются субмикроскопические включения низкопробного самородного золота IV (581–778 ‰). Вероятно, оно формировалось в результате окисления сульфидов и теллуридов Au–Ag, которые были заключены в пирите в виде субмикроскопических включений.

В результате предшествующих работ рудопроявление Эвевпента было отнесено к золото-кварцевому минеральному типу на основании отсутствия в составе рудной минерализации сульфидов цветных металлов и высоких отношений золота к серебру в рудах (Вартанян и др., 2000ф; Безрукова и др., 2004ф; Семериков и др., 2021ф). Новые данные о минеральном составе руд, позволяют пересмотреть этот вывод и отнести рудопроявление к золото-теллуридному минеральному типу, на что указывают следующие признаки:

1) самородное золото в рудах образует устойчивую ассоциацию с теллуридами (алтаит, калаверит, петцит, гессит), значительная сульфидная или сульфосольная минерализация в ассоциации с самородным золотом не обнаружена;

2) отношение золота к серебру в рудах варьирует от 1:1 до 5:1 (Безрукова и др., 2004ф; Семериков и др., 2021ф);

3) значения пробности самородного золота изменяются в широком диапазоне от 505 до 989 ‰, однако его средняя пробность достаточно высокая и составляет 882 ‰ (по 73 определениям).

На основании перечисленных признаков, в соответствии с классификацией эпитермальных месторождений (вулканогенной золото-серебряной формации), предложенной А.Н. Некрасовой с соавторами (1997), рудопроявление Эвевпента следует относить к золото-теллуровой группе (субформации), золото-теллуридному минеральному типу (классу).

Третье защищаемое положение. *На рудопроявлении Эвевпента минеральные ассоциации в калиевополевошпат-кварцевых жилах были образованы при последовательном снижении температуры и солености рудообразующих флюидов. Жилы подстадии I формировались слабосолеными ($T_{пл.}$ от –3.3 до –0.7 °C) средне-, низкотемпературными флюидами в интервале от 338 до 260 °C. Жилы подстадии II формировались слабосолеными ($T_{пл.}$ от –0.5 до –0.1 °C) низкотемпературными флюидами в интервале от 233 до 183 °C. Минералообразующие среды характеризовались как гомогенным, так и гетерогенным состоянием и были представлены системой $H_2O–CO_2$ с растворенными сульфатами и гидрокарбонатами натрия, калия, магния.*

В рудных жилах *подстадии I* (*золото-теллуридно-кварцевой*) флюидные включения обнаружены в кварце IIa и IIIa, а также в кварце IVa, с которым связана богатая золото-теллуридная минерализация.

Кварц IIa и IIIa при комнатной температуре содержит двухфазные газово-жидкие включения (40 – 50 об. % газа). Они обладают субизометричной, вытянутой или уплощенной формой, а размер варьирует от 10 до 50 мкм (**рис. 8 а**). Кварц IVa содержит многочисленные флюидные включения, они обладают субизометричной до сферической формой, размер варьирует от 8 до 20 мкм. При комнатной температуре в кварце IVa изучена ассоциация, которая представлена четырьмя типами включений. Включения первого типа являются двухфазными, содержащими кристаллические фазы и лишенные газового пузырька (**рис. 8 б**). Включения второго типа, содержат жидкость, газ и кристаллические фазы (**рис. 8 б**). Включения третьего типа являются двухфазными газово-жидкими (20 – 80 об. % газа). Включения четвертого типа содержат только газовую фазу. В кварце IVa преобладают включения первого типа. Все типы включений наблюдаются в пределах единых зон роста, что означает, что они были захвачены растущим кристаллом одновременно (**рис. 8 в**). Переменные соотношения фаз указывают на гетерогенный захват во включения жидкой и газовой фаз. По данным КР-спектроскопии во всех перечисленных включениях жидкая фаза представлена водой с присутствием сульфат-ионов (SO_4^{2-}), газовая фаза – углекислым газом, а кристаллические фазы в кварце IVa – алунитом, родохрозитом, аргентопиритом и минералами семейства оксидов марганца (**рис. 9**). Результаты микротермометрических исследований приведены в **табл. 3**.

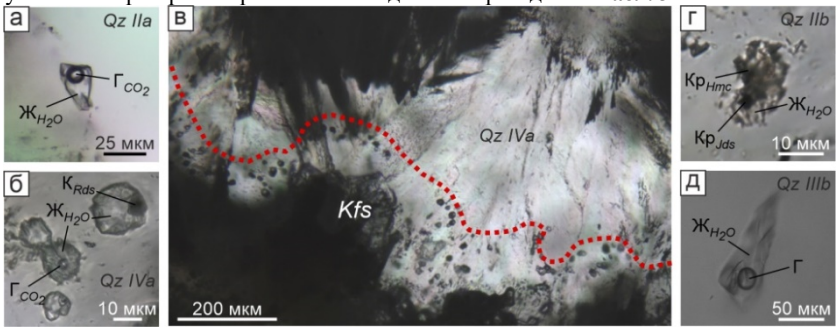


Рис. 8. Разновидности изученных флюидных включений: а – двухфазное газово-жидкое включение; б – ассоциация двухфазных газово-жидких и многофазных кристалло-флюидных включений; в – зонально расположенные флюидные включения в халцедоновидном кварце (красной пунктирной линией показана зона роста); г – двухфазное кристалло-флюидное включение; д – двухфазное газово-жидкое включение. Изображения в проходящем свете. Ж$_{H2O}$ – жидкая фаза (вода), Г$_{CO2}$ – газовая фаза (углекислый газ), К$_{Rds}$ – кристаллическая фаза (родохрозит), *Kfs* – калиевый полевой шпат; К$_{Hmc}$ – кристаллическая фаза (гидрослюды), К$_{Jds}$ – кристаллическая фаза (йордизит), Г – газовая фаза, *Qz IIa*, *Qz IVa* – кварц второй и четвертой генерации в рудных жилах подстадии I соответственно, *Qz IIb*, *Qz IIIb* – кварц второй и третьей генерации в рудных жилах подстадии II соответственно.

В жилах *подстадии II* (*сульфидно-теллуридно-кварцевой с самородным золотом*) флюидные включения обнаружены в кварце IIb, насыщенном рудной минерализацией, и в позднем кварце IIIb, не содержащем рудную минерализацию. Ранний микрозернистый кварц Ib не содержит флюидных включений, пригодных для исследования.

Кварц IIb содержит большое число флюидных включений, которые обладают субизометричной формой или демонстрируют сложную морфологию, а их размеры

варьируют от 8 до 40 мкм. Ассоциация флюидных включений в кварце IIb при комнатной температуре состоит из двух типов. Включения первого типа – двухфазные газово-жидкие (20 – 40 об. % газа), включения второго типа – двухфазные, содержат жидкую и кристаллические фазы (**рис. 8 г**). Кварц IIIb содержит флюидные включения, которые имеют вытянутую форму, а их размеры составляют от 10 до 50 мкм (**рис. 8 д**). Данная ассоциация состоит из двухфазных газово-жидких включений (< 30 об. % газа). По данным КР-спектроскопии жидкая фаза во всех типах включений представлена водой, а кристаллические фазы в кварце IIb – минералами группы гидрослюд и йордизитом. Исследование газовой фазы всех типов флюидных включений в кварце IIb и IIIb не выявило присутствия H_2O, CO_2, N_2 или других газообразных компонентов. Результаты микротермометрических исследований приведены в **табл. 3**.

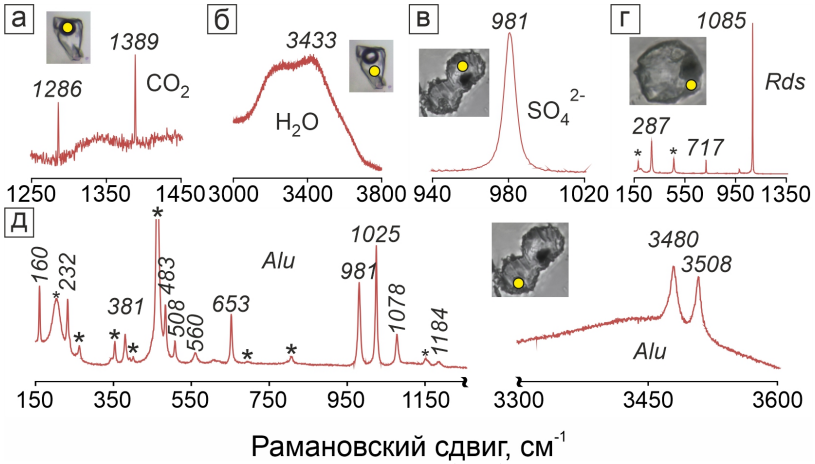


Рис. 9. Некоторые представительные КР-спектры фаз флюидных включений при комнатной температуре: а – углекислый газ (CO_2); б – вода (H_2O); в – сульфат-ион (SO_4^{2-}); г – родохрозит (*Rds*); д – алунит (*Alu*). На фото-миниатюрах желтыми кругами обозначены аналитические точки. *Пики кварца.

В изученных образцах калиевополевошпат-кварцевых жил *подстадии I* ранний кварц IIa и IIIa содержит двухфазные газово-жидкие включения, гомогенизирующиеся в жидкость при нагревании. Относительная однородность температур гомогенизации и отсутствие флюидных включений с контрастным соотношением жидкости и газа указывает, что минеральные ассоциации, содержащие кварц IIa и IIIa, сформированы из гомогенного водного жидкого флюида. В позднем кварце IVa, содержащем богатую золото-теллуридную минерализацию, обнаружена ассоциация флюидных включений, состоящая одновременно из существенно газовых и существенно жидких включений. Их сосуществование в пределах единых зон роста и единых ассоциаций флюидных включений свидетельствует о кристаллизации кварца IVa из гетерогенной среды, включающей сосуществующие газовую и жидкую фазы. Наличие низкоплотного (рассчитанная плотность 0.036–0.094 г/см^3, 6 определений) газообразного CO_2 и жидкой H_2O указывает, что кварц IIa, IIIa и IVa формировались из водного флюида с незначительным содержанием CO_2. Аналогично, в калиевополевошпат-кварцевых жилах *подстадии II* кварц IIb и поздний кварц IIIb формировались из водного флюида, но с пренебрежимо малым содержанием CO_2.

Таблица 3

Результаты микротермометрических исследований флюидных включений

№ п/п	Подстадия	Генерация кварца	Кол-во измерений	$T_г$, °C	$T_{эв}$, °C	$T_{пл}$, °C
Участок Центральный						
1	Подстадия I (золото-теллуридно-кварцевая)	IIa	6	320…360 / 338	–8.5…–5.5	–3.3…–2.5
2		IIIa	7	315…364 / 331	–6.0…–5.5	–0.1
3		IVa	25	175…325 / 260	–8.0…–5.5	–1.4…–0.7
Участок Северный						
4	Подстадия II (теллуридно-сульфидная-кварцевая с самородным золотом)	IIb	9	219…248 / 233	–6.0…–5.0	–0.5…–0.2
5		IIIb	20	140…214 / 183	–7.0…–5.0	–0.4…–0.1

Примечание. Для температуры гомогенизации указан интервал температур / средние значения

Высокие температуры эвтектики, характерные для ассоциаций флюидных включений во всех изученных генерациях кварца, указывают на отсутствие компонентов, понижающих температуры эвтектики. Традиционно считается, что в водных флюидах эпитермальных золото-серебряных месторождений адуляр-серицитового (*low-sulfidation*) типа доминируют хлориды K–Na (Heald et al., 1987; Simmons et al., 2005). Эвтектическое плавление в водно-хлоридных системах происходит ниже –10…–21 °C (Борисенко, 1977). В случае рудопроявления Эвевпента замороженные водные растворы в изученных флюидных включениях начинают плавиться при температурах от –8 до –5 °C. Такие температуры соответствуют бинарным водным растворам гидрокарбоната калия и сульфата магния, а также тройным системам, содержащим сульфаты Na, K и Mg (Борисенко, 1977). Эвтектические растворы в бинарных водных системах сульфатов Na, K и Mg начинают плавиться при –1.2, –1.6 и –4.8 °C соответственно (Киргинцев, 1972). Однако температура эвтектики в системе Na_2SO_4–H_2O может понижаться до –3.6 °C из-за метастабильного образования льда–гептагидрата (Киргинцев, 1972). В системах $MgSO_4$–H_2O образуются метастабильные ассоциации лед–гидрат, понижая температуры эвтектики до –8 °C (Киргинцев, 1972). Понижение температуры эвтектического плавления может также происходить в многокомпонентных растворах: добавление $MgSO_4$ к Na_2SO_4–H_2O понижает точку эвтектики до –5 °C, тогда как добавление $KHCO_3$ опускает ее ниже –6 °C, приближая к значениям, приведенным в **табл. 3**. Полученные данные о температуре эвтектики согласуются с систематическим обнаружением в КР-спектрах водной фазы включений полосы при 981 $см^{-1}$, которая свидетельствует о присутствии сульфат-ионов. Наличие сульфат- и гидрокарбонат-ионов в растворах также подтверждается наличием дочерних кристаллов родохрозита и алунита, идентифицированных во включениях в кварце IVa. Обнаружение дочерних кристаллов аргентопирита и оксидов марганца можно рассматривать как свидетельство присутствия соответствующих металлов в растворах и, следовательно, потенциальной металлоносности флюида. В калиевополевошпат-кварцевых жилах *подстадии II* в кварце IIb примечательны кристалло-флюидные включения, содержащие минералы группы гидрослюд и рудную фазу, интерпретированную как дисульфид молибдена – йордизит (Zhegunov et al., 2025). Многие включения содержат так

много слюдистых минералов, что напоминают раскристаллизованные расплавные включения в магматических минералах (**см. рис. 8 г**). Эти фазы, предположительно, являются дочерними кристаллами: многочисленные дочерние фазы могут формироваться, когда растворимость этих минералов низкая (Реддер, 1987). Следовательно, захваченные флюиды могли обладать повышенными концентрациями K, Al, Si и Mo. Поскольку точные данные о составе флюидных включений отсутствуют, а оценки ионного состава дают лишь общее представление о химии флюида, определение их истинной солености является сложной задачей: использование концепции NaCl-эквивалента не подходит, так как оно обычно дает заниженные значения для сульфатных и гидрокарбонатных водных растворов.

Оценка температур минерализации эпитермальных месторождений требует учета глубин их формирования (Sherlock et al., 1996; Simpson, Mauk, 2011; Simpson et al., 2015). Формирование эпитермальных золото-серебряных месторождений происходит на глубине < 1 км в зонах смешения эндогенных и метеорных флюидов (Wilkinson, 2001; Bodnar et al., 2014). В условиях низкого давления температуры гомогенизации первичных флюидных включений могут приближаться к температурам кристаллизации кварца, поскольку поправки на давление в эпитермальных системах незначительны (Bodnar et al., 1985; Реддер, 1987; Wilkinson, 2001). Однако надежная оценка давления невозможна, поскольку для рассматриваемых составов водных растворов отсутствуют справочные данные для расчета плотности по микротермометрическим результатам.

Таким образом, результаты комплексного исследования флюидных включений в кварце эпитермального золото-серебряного рудопроявления Эвевпента указывают на то, что кварц формировался в широком диапазоне температуры ($T_{г.}$ 338–183 °C) и солености ($T_{пл.}$ –3.3…–0.1 °C) минералообразующих растворов (**см. табл. 3; рис. 10**). В наиболее раннем кварце *подстадии I* зафиксированы максимальные температуры и максимальная соленость, эти флюиды были наиболее обогащены CO_2. Кварц в минеральных ассоциациях, содержащих минералы благородных металлов, кристаллизовался в более узких температурных интервалах: кварц IVa в жилах *подстадии I* от 325 до 175 °C (средняя – 260 °C), а кварц IIb в жилах *подстадии II* – от 219 до 248 °C (средняя – 233 °C). Эти температурные диапазоны хорошо сопоставимы с температурами формирования рудных минеральных ассоциаций многих других эпитермальных месторождений полуострова Камчатка (Бортников, Толстых, 2023).

На **рис. 10** можно наблюдать общую тенденцию к постепенному снижению температуры и солености минералообразующих флюидов в направлении от ранних к поздним минеральным ассоциациям. Эта тенденция может указывать на прогрессивное разбавление гидротермальных флюидов холодными поверхностными метеорными водами, что является одним из благоприятных механизмов формирования эпитермальных руд (Wilkinson, 2001). Различия в солености флюидов, сформировавших кварц IIa и IIIa при сходных температурах гомогенизации, могут указывать на процесс изотермического разбавления глубинными нагретыми метеорными водами. Аналогичный процесс описан для богатого серебром и цветными металлами эпитермального месторождения Гложе, Иран (Mehrabi et al., 2016). Увеличение солености при одновременном снижении температуры гомогенизации (от кварца IIIa к кварцу IVa) может быть интерпретировано как результат кипения флюида. Этот вывод согласуется с гетерогенным составом флюидных включений в кварце IVa. Признаки кипения установлены на многих эпитермальных месторождениях, в том числе на месторождениях Камчатки (Боровиков и др., 2009; Sidorov et al., 2020). В кварце *подстадии II* тенденция разбавления гидротермального флюида метеорными водами от раннего кварца IIb к позднему IIIb выражена наиболее явно.

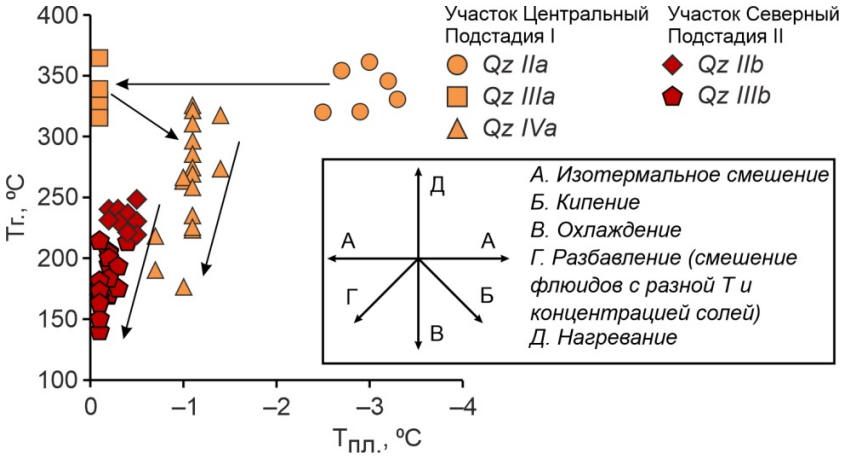


Рис. 10. Диаграмма зависимости температуры гомогенизации ($T_г$.) от температуры плавления льда ($T_{пл.}$). На врезке показаны пути эволюции флюида, обусловленные различными геологическими процессами (Wilkinson, 2001).

Примечательно наличие сульфат-ионов в растворах флюидных включений рудопроявления Эвевпента. Основываясь на генетической модели формирования эпитермальных месторождений, появление сульфат-ионов в эпитермальных системах адуляр-серицитового (*low-sulfidation*) типа может быть следствием двух основных процессов: (1) окисление сероводорода (H_2S) на малых глубинах эпитермальных систем (так называемое «сольфатарное изменение»); (2) гипергенное окисление сульфидов (Heald et al., 1987). В большей степени эти механизмы проявляются на верхних уровнях эпитермальных систем (Heald et al., 1987; Hedenquist et al., 2000; Коваленкер и др., 2006), что может подтверждать близповерхностную природу рудопроявления Эвевпента. Второй механизм гипергенного окисления сульфидов предполагает действие сильных окислителей на первичные руды и обычно сопровождается массовым развитием ярозита и алунита (Sillitoe, 2019). Однако реализация подобного механизма наиболее характерна для регионов с тропическим климатом и менее вероятна для эпитермальных золото-серебряных месторождений полуострова Камчатка.

Заключение

В результате проведенного исследования получены новые данные о минералогическом составе руд, взаимоотношениях минералов и последовательности минералообразования на эпитермальном золото-серебряном рудопроявлении Эвевпента. Получены первые данные об изотопном возрасте рудопроявления, на основании чего установлена временная связь между процессом рудообразования и вмещающими вулканическими комплексами. Определены параметры и эволюция минералообразующих сред, сформировавших рудные калиевополевошпат-кварцевые жилы.

Проведенные изотопно-геохронологические исследования позволили установить время формирования рудопроявления Эвевпента, которое происходило в период от 11.7 ± 0.7 до 8.7 ± 0.2 млн лет. Установлены две последовательные подстадии рудообразования, которые хорошо сопоставимы с возрастом двух непрерывно формировавшихся

вулканических комплексов: *подстадия I* (11.7 ± 0.7 – 11.4 ± 0.4 млн лет) связана с умуваямским вулканическим комплексом (17.0–9.2 млн лет), а *подстадия II* (9.3 ± 0.3 – 8.7 ± 0.2 млн лет) – с периодом развития толятоваямского вулканического комплекса (10.0–3.0 млн лет). Временная взаимосвязь между формированием рудных жил *подстадии II* и толятоваямским комплексом подтверждена изотопными датировками вмещающих субвулканических тел риодацитов (~ 9 млн лет; U–Pb датирование по циркону). Формирование рудопроявления Эвевпента связано с островодужным этапом развития Центрально-Камчатского вулканогенного пояса и по времени образования попадает в наиболее продуктивную на золото на Камчатке миоцен-плиоценовую металлогеническую эпоху.

В результате исследования впервые определены минеральные формы благородных металлов в рудах рудопроявления Эвевпента. Основная минеральная форма нахождения золота – весьма мелкое (от десятков микрон до 0.10–0.15 мм) высокопробное самородное золото (средняя пробность 882 ‰, по 73 определениям). Второй по распространенности минеральной формой является калаверит. Менее распространены петцит и сульфиды ряда ютенбогардтит–петровскаит. Серебро присутствует в виде акантита, гессита, петцита, самородного серебра, хлораргирита, науманнита, аргентопирита. С минералами благородных металлов ассоциируют сульфидная (пирит, марказит, халькопирит, галенит, сфалерит, йордизит, киноварь, борнит) и теллуридная (алтаит, колорадоит) минерализация. Ассоциация высокопробного самородного золота с теллуридными минералами и высокое отношение золота к серебру в рудах позволили отнести рудопроявление Эвевпента к золото-теллуридному минеральному типу эпитермальных месторождений (вулканогенной золото-серебряной рудной формации).

На основании установленных минеральных взаимоотношений, текстурно-структурных особенностей руд, результатов изотопного датирования, а также с учетом данных предшественников, реконструирована последовательность минералообразования на рудопроявлении Эвевпента. Выделены три этапа: *дорудный* (пропилитовый), *рудный* (золото-серебряный) и *гипергенный*. На *рудном этапе* установлены две стадии: *предрудная* (пирит-глинисто-кварцевая), связанная с формированием околотрещинных аргиллизитов с рассеянной сульфидной минерализацией, и *рудная стадия* (карбонат-калиевополевошпат-кварцевая), с которой связано образование золотоносных кварцево-жильных зон. В рамках рудной стадии выделены две разновозрастные подстадии, которым соответствуют две минеральные ассоциации: *золото-теллуридно-кварцевая* (*подстадия I*, возрастом 11.7 ± 0.7 – 11.4 ± 0.4 млн лет) и *теллуридно-сульфидно-кварцевая с самородным золотом* (*подстадия II*, возрастом 9.3 ± 0.3 – 8.7 ± 0.2 млн лет). На *гипергенном этапе* в приповерхностных условиях формировались минералы зоны окисления.

Формирование рудных калиевополевошпат-кварцевых жил происходило в результате циркуляции гидротермальных флюидов. Среды минералообразования были как гомогенными, так и гетерогенными, главными компонентами флюидов были H_2O и низкоплотный CO_2. Температура флюида соответствовала средне-низкотемпературным условиям ($T_{г.}$ от 338 до 183 °C). Минералообразующие флюиды были слабосолеными ($T_{пл.}$ от –3.3 до –0.1 °C) и сильно разбавленными, вероятно, метеорными водами. Изучение флюидного режима рудопроявления позволяет заключить, что его формирование происходило в условиях постепенного снижения температуры, солености и содержания CO_2 в минералообразующих средах. Эти изменения прослеживаются как от *подстадии I* к *подстадии II*, так и в пределах каждой подстадии от ранних к поздним минеральным ассоциациям.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

1. **Жегунов П.С.**, Житова Е.С., Кутырев А.В., Швейгерт П.Е., Грибушин К.А., Москалева С.В. «Горчичное» золото эпитермального золото-серебряного рудопроявления Эвевпента (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2024а. № 4. С. 38–54. DOI: 10.31857/S0203030624020053
2. **Жегунов П.С.**, Кутырев А.В., Житова Е.С., Москалева С.В., Швейгерт П.Е. Первые данные о минералогии эпитермального серебряно-золоторудного проявления Эвевпента (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 2024б. № 2. С. 59–77. DOI: 10.31857/S0869605524050038
3. **Жегунов П.С.**, Шевелева Р.М., Житова Е.С., Хохлова М.А., Москалева С.В., Золотарев А.А. Калиевый полевой шпат рудных жил на эпитермальном золото-серебряном рудопроявлении Эвевпента (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2026. № 3. С. 80–94. DOI: 10.7868/S2658435226030046
4. **Zhegunov P.S.**, Smirnov S.Z., Shaparenko E.O., Ozerov A.Yu., Scholz R. Fluid Inclusion Constraints on the Formation Conditions of the Evevpenta Au–Ag Epithermal Deposit, Kamchatka, Russia // Minerals. 2025. Vol. 15, No. 11. Paper 1196. DOI: 10.3390/min15111196

Публикации в сборниках материалов конференций, семинаров, школ:

1. Буханова Д.С., **Жегунов П.С.**, Швейгерт П.Е. Формы нахождения золота и серебра в зоне гипергенеза эпитермальных месторождений адуляр-кварцевого типа Камчатки // Новое в познании процессов рудообразования: Двенадцатая Российская молодежная научно-практическая школа: сборник материалов, Москва, 27 ноября – 01 декабря 2023 года. Москва: ИГЕМ РАН, 2023. С. 18–21.
2. **Жегунов П.С.**, Московский А.С., Швейгерт П.Е. Россыпное золото проявления Эвевпента (Камчатский перешеек) // Строение Литосферы и Геодинамика: Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции, Иркутск, 11–16 мая 2021 года. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. С. 103–105.
3. **Жегунов П.С.** Минералы благородных металлов эпитермального золото-серебряного рудопроявления Эвевпента (полуостров Камчатка) // Новое в познании процессов рудообразования: Сборник материалов Десятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием, Москва, 29 ноября – 03 декабря 2021 года. Москва: ИГЕМ РАН, 2021. С. 109–112.
4. **Жегунов П.С.**, Москалева С.В., Швейгерт П.Е. Особенности эпитермальной минерализации северного фланга рудопроявления Эвевпента (Северная Камчатка, Россия) // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2022 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 119–122.
5. **Жегунов П.С.**, Кутырев А.В., Москалева С.В. Горчичное золото рудопроявления Эвевпента (Северная Камчатка, Россия) // Материалы XII Международной школы по наукам о Земле им. проф. Л. Л. Перчука (ISES–2022), Петропавловск-Камчатский, 07–19 сентября 2022 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 113.

6. **Жегунов П.С.**, Шапаренко Е.О. Первые данные об условиях образования рудопроявления Эвевпента (Камчатка, Россия): по результатам изучения флюидных включений в кварце // Новое в познании процессов рудообразования: Сборник материалов Одиннадцатой Российской молодежной научно-практической Школы. Тезисы докладов молодых ученых, Москва, 28 ноября – 02 декабря 2022 года. Москва: ИГЕМ РАН, 2022. С. 101–102.

7. **Жегунов П.С.**, Грибушин К.А., Швейгерт П.Е., Буханова Д.С. Текстурные особенности кварца как индикатор рудообразующих процессов, на примере эпитермального рудопроявления Эвевпента (Камчатка, Россия) // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2024 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 211–213.

8. **Жегунов П.С.**, Житова Е.С., Кутырев А.В., Швейгерт П.Е. Минералогическая и физико-химическая характеристика эпитермального золото-серебряного рудопроявления Эвевпента (Камчатка) // Материалы Годичного собрания РМО «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий», Апатиты, 16–21 сентября 2024 года. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 124–125.