

УДК 553.21/.24

РУДООБРАЗУЮЩИЕ ФЛЮИДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВСКОЕ И ДАВЕНДА (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2020 г. А. А. Боровиков^{a, *}, Ю. А. Калинин^{a, b, **}, Б. Н. Абрамов^{c, ***}, В. П. Сухоруков^{a, b}

^aИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^bНовосибирский национальный исследовательский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия

^cИнститут природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, 16а, Чита, 672014 Россия

*e-mail: borovik@igm.nsc.ru

**e-mail: kalinin@igm.nsc.ru

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

Поступила в редакцию 09.11.2018 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 31.01.2020 г.

Изучение состава флюидных включений в минералах руд Мо-порфирового месторождения Давенда и сульфидно-кварцевого золоторудного месторождения Александровское, а также в минералах магматических пород, показало, что рудообразующие флюиды наследуют солевой и газовый состав магматогенных флюидов, генерация которых происходила при кристаллизации пород “рудносно-го” амуджикано-сретенского комплекса, формировавшегося одновременно с Au- и Мо-оруденением. Золотоносные сульфидно-кварцевые жилы Александровского месторождения формировались при участии двух типов гидротермальных флюидов, различающихся по составу солей и газовой фазы – гомогенных Са–Na-хлоридных флюидов с CO₂ и гетерофазных Na–K–Fe-хлоридных флюидов, что указывает на два источника рудообразующих флюидов при образовании Au-минерализации. Na–K–Fe-хлоридные флюиды по солевому и газовому составу были аналогичны рудообразующим флюидам Мо-минерализации месторождения Давенда. Рудообразующие Са–Na-хлоридные с CO₂ флюиды Александровского месторождения сопоставимы по солевому и газовому составу с магматогенными флюидами кварцевых диорит-порфиров и диоритовых порфиров. Рудообразующие Na–K–Fe-карбонатно-хлоридные флюиды месторождений Давенда и Александровское проявляют большое сходство по составу с магматическими флюидами гранит-порфиров и подчеркивают генетическую идентичность Мо-минерализации, проявленной на обоих месторождениях. Полученные данные подтверждают широко распространенное мнение о наличии генетической связи золотого оруденения с дайками среднего и основного состава, а молибден-порфирового оруденения с гранит-порфирами амуджикано-сретенского комплекса. Вещественными агентами этой генетической связи являются металлоносные магматогенные флюиды, солевой и газовый состав которых наследуют рудообразующие флюиды. Глубина образования продуктивных рудных минеральных ассоциаций в жилах месторождений Александровское и Давенда оценивается в 7.9–7 и 8–6.3 км соответственно, что не свойственно типично порфировым месторождениям, для формирования которых характерна меньшая глубина.

Ключевые слова: флюидные включения, рудообразующие и магматические флюиды, Cu–Mo-порфиновые и золоторудные месторождения

DOI: 10.31857/S0016777020040036

ВВЕДЕНИЕ

Регион Восточного Забайкалья чрезвычайно удобен для исследования феномена совмещения золоторудных и молибденовых (“молибден-порфиновых”) месторождений, а также генетических связей оруденения с процессами единовременного магматизма. Примеры такого сочетания рудных месторождений известны во многих регио-

нах – Кордильеры Северной Америки, Китай, Киргизия, Алдан и многие другие (Соловьёв, 2014). Ранее была обоснована парагенетическая связь месторождений с мезозойскими магматическими комплексами (Амуджикано-Сретенским и Шахтаминским), образовавшимися на коллизионном и постколлизионном этапах геодинамического развития территории (Кузьмин, Антипин,

1972; Козлов, 1985; Таусон, 1977, 1984, 1989; Ан-типин, 1970; Таусон и др., 1987; Зорина, Куликова, 1998; Андреева и др., 1996; Коваль, 1998; Спиридонов и др., 2006; Абрамов и др., 2017, 2018). Амуджикано-сретенский комплекс впервые был описан на территориях севернее монголо-охотской сутуры, шахтаминский описан на территориях, расположенных южнее. В составе амуджикано-сретенского и шахтаминского комплексов выделяются три интрузивные фазы внедрения и поздняя заключительная дайковая серия (Спиридонов и др., 2006). Состав и геохимические особенности пород амуджикано-сретенского и шахтаминского комплексов очень близки. Определения абсолютного возраста пород амуджикано-сретенского и шахтаминского комплексов – 180–107 и 167–140 млн лет соответственно – могут указывать на большую длительность периода магматической активности при формировании пород массивов амуджикано-сретенского комплекса (Спиридонов и др., 2006). С гранитоидами амуджикано-сретенского комплекса связано промышленное молибденовое, золотое и золото-полиметаллическое оруденение, с породами шахтаминского комплекса связывается молибденовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение, а также проявления As, Sb и Hg. А.М. Спиридонов, Л.Д. Зорина и другие указывали, что одним из главных отличий амуджикано-сретенского комплекса является повышенное содержание золота (от 0.005 до 0.23 г/т) в породах по сравнению с породами шахтаминского комплекса, где содержания Au ниже кларковых (Спиридонов и др., 2006, 2010). Даже если такое обогащение в какой-то степени связано с постмагматической гидротермальной проработкой, учитывая единовременность магматизма и рудообразования, это предполагает некоторые различия в условиях дегазации магм и образования расплавов в глубинных очагах при становлении массивов и даек амуджиканского и шахтаминского комплексов. Последнее может подтверждаться отсутствием зависимости содержания Au в породах комплексов от его содержания во вмещающих породах (Спиридонов и др., 2010).

Магматические комплексы Восточного Забайкалья, с которыми связана Au- и Cu–Mo-порфировая минерализация региона, представлены глубоко дифференцированными плутоническими и вулканоплутоническими производными шошонит-латитовой и высококальциевой известково-щелочной магм (Сотников и др., 1977; Спиридонов и др., 2006; Берзина и др., 2013, 2015). Установленная перемежаемость этих магм во времени и присутствие комбинированных даек сложного

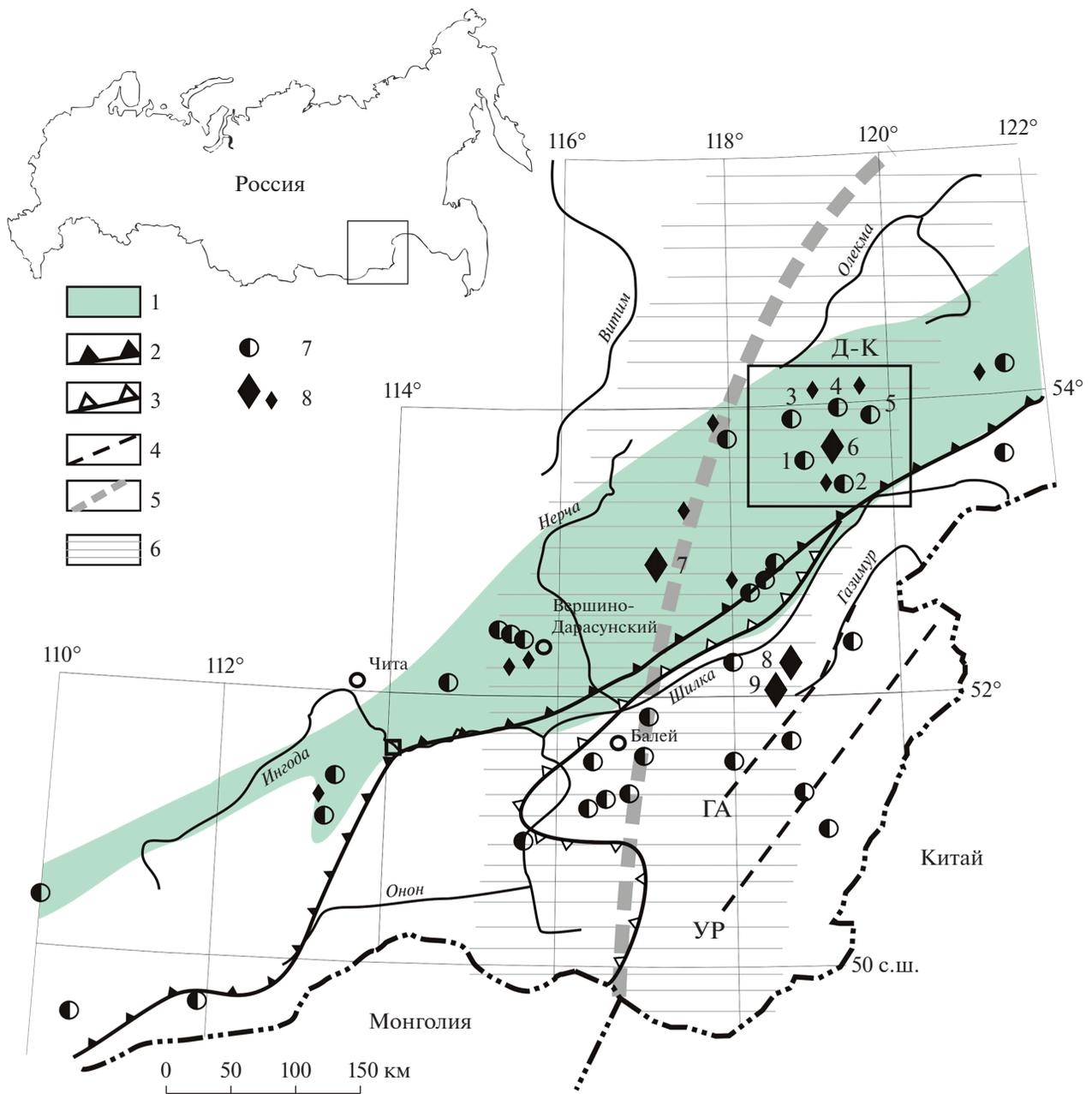
строения в рудных полях Mo-порфировых и золоторудных месторождений указывает на одновременное существование магматических очагов разных глубинных уровней (мантийного и корового), с которыми могла быть связана генерация магматических расплавов и магматогенных флюидов, участвовавших в процессах рудообразования на золоторудных и Cu–Mo-порфировых месторождениях.

Основными критериями парагенетической связи процессов рудообразования и магматизма, в первую очередь, служат одновременность их проявления и совмещенность ареалов распространения. Проследить генетические связи рудной минерализации с конкретными магматическими фазами можно путем сопоставления их геохимического состава. Одним из таких инструментов является исследование газового и солевого составов, а также металлоносности магматических и рудообразующих флюидов, по данным, полученным при изучении флюидных включений в минералах руд месторождений и пород рудоносных магматических комплексов. Идентификация конкретных фаз рудоносных магматических комплексов, как вероятных магматических источников рудообразующих флюидов, может быть использована как критерий генетической связи рудообразования и магматизма и иметь большое значение для создания адекватных генетических моделей рудных месторождений.

ОЧЕРК ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Ареал пространственного совмещения золоторудных и молибден-порфировых месторождений в пределах Восточного Забайкалья образует субширотный золото-молибденовый пояс (по С.С. Смирнову, 1944) и частично входит в недавно выделенную на основании анализа геофизических и сейсмографических данных (Хомич, Борискина, 2017) Далайнор-Газимуровско-Олекминскую тектоническую и минерагеническую зону, в которой располагается основная масса крупных рудных узлов с Au, Mo, U, Pb–Zn, Cu и флюоритовой минерализацией (фиг. 1).

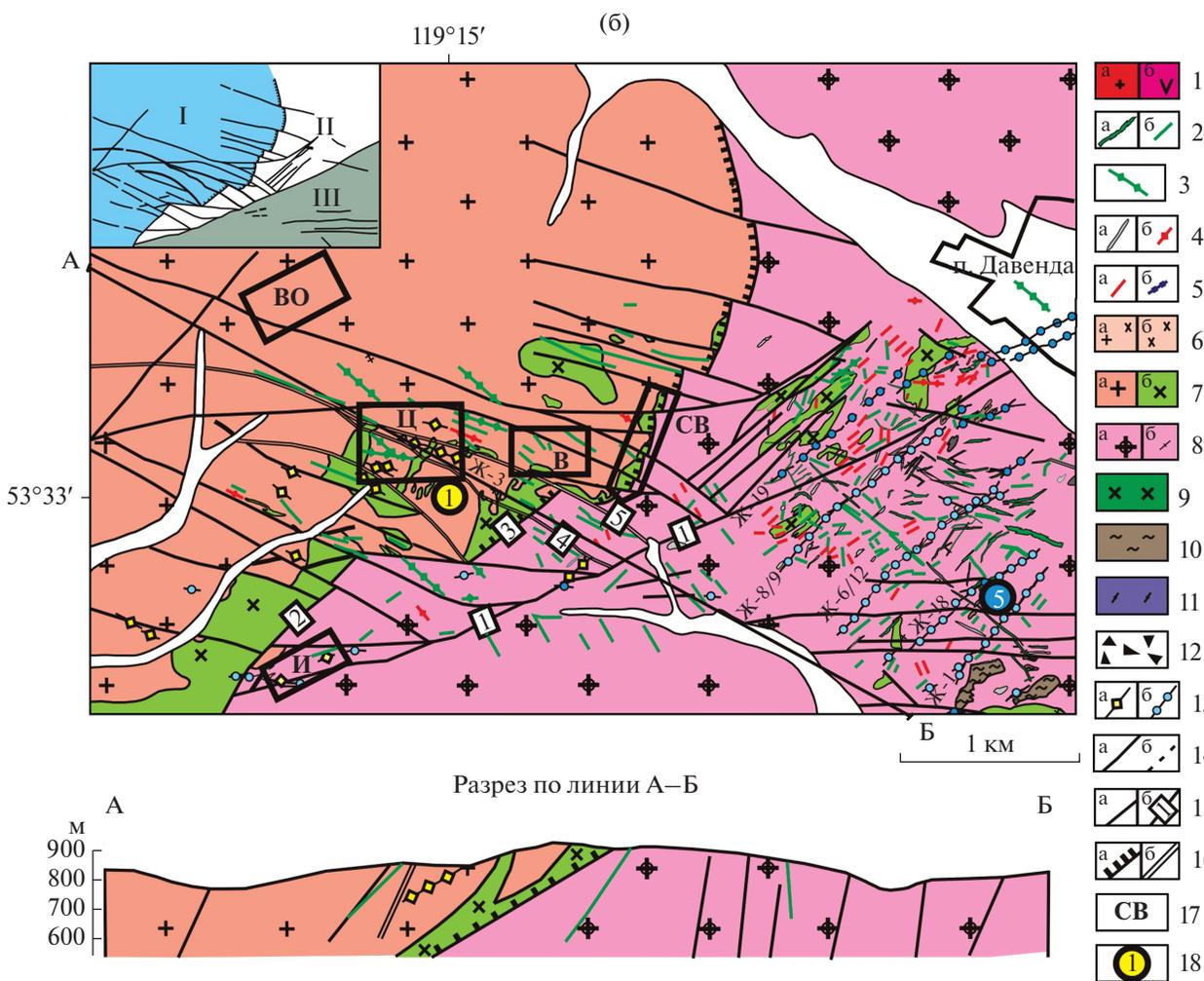
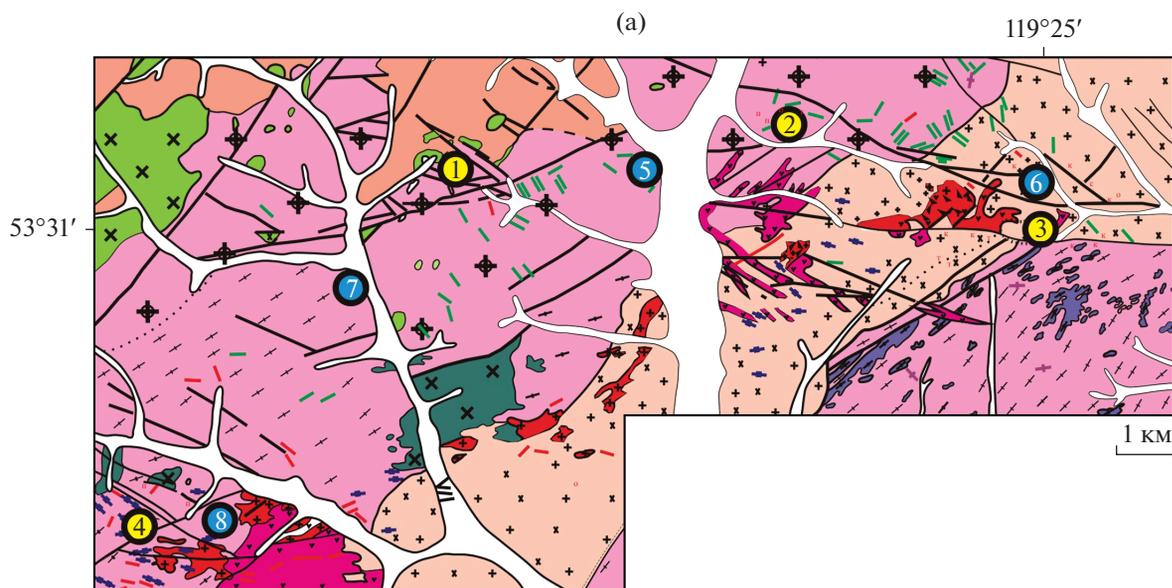
Давендинско-Ключевской рудный узел, расположенный в пределах золото-молибденового пояса, образован компактной локализацией золоторудных (Александровское, Западное, Ключевское, Костромихинское) и молибденовых месторождений (Давендинское, Алексеевское, Большекудечинское) (фиг. 2). Основную роль в геологическом строении рудного узла играют гранитоидные породы палеозойского и мезозойского возраста (фиг. 2). Стратифицированные образования имеют весьма незначительное распространение и представлены останцами архейских метаморфических пород среди раннепалеозой-



Фиг. 1. Схема расположения золоторудных и молибден-порфировых месторождений Восточного Забайкалья. Составлено с использованием данных (Спиридонов и др., 2006; Хомич, Борискина, 2017, а также Геологической карты РФ 1 : 1000000, Алдано-Байкальская серия). Условные обозначения: 1 – металлогенический золото-молибденовый пояс по С.С. Смирнову; 2 – основная ветвь Монголо-Охотской сутуры; 3 – Ононская ветвь Монголо-Охотской сутуры; 4 – разломы, возникшие или обновленные в ходе коллизии, ГА – Газимуровский, УР – Урулунгуевский; 5 – проекция на современную поверхность фронтальной части слеба, по (Хомич, Борискина, 2017); 6 – Далайнор-Газимуровско-Олекминская тектоническая и минерагеническая зона; 7 – золоторудные месторождения; 8 – молибден-порфировые месторождения и проявления. Золоторудные месторождения Давендинско-Ключевского рудного узла (Д-К) – Александровское (1), Ключевское (2), Итака (3), Уконинское (4), Амарское (5). Крупные молибден-порфировые месторождения – Давенда (6), Жирекен (7), Шахтама (8), Бугдая (9).

ских. Породы рудоносного амуджикано-сретенского комплекса (J_2-K_1) представлены интрузиями порфировидных-гранодиоритов и умеренно щелочных крупно-порфировидных гранитов и гранит-порфиров (фиг. 2а).

Заключительная дайковая серия амуджикано-сретенского комплекса в пределах месторождений Давенда и Александровское представлена протяженными крутопадающими дайками северо-восточного, северо-западного и субширотного про-



Фиг. 2. Схемы геологического строения Давенда-Ключевского рудного узла (а), месторождений Александровское и Давенда (б) и вертикальный разрез через площади месторождений (в), (составлено Б.Н. Абрамовым). *Амуджикано-сретенский комплекс (J₂-K₁)*. 1 – гранитоиды первой (а) и второй (б) фаз; третья фаза дайковая серия: 2 – диорит-порфириды штоки (а) и дайки (б); 3 – дайки кварцевых диорит-порфиров; 4 – гранит-порфиры штоки (а) и дайки (б); 5 – дайки фельзитов (а) и гранит-порфиров (б). *Амананский комплекс (J₂₋₃)*. 6 – гранодиориты (а), диориты и кварцевые диориты (б). *Бичурский комплекс (P₂)*. 7 – средне-крупнозернистые биотит-роговобманковые граниты (а) и кварцевые диориты (б). *Олекминский комплекс (PZ₁)*. 8 – порфиробластовые граниты (а) и гнейсовидные граниты (б). *Кручининский комплекс (PZ₁)*: 9 – диориты и габбродиориты. *Олекминский комплекс (PZ₁)*. 10 – кристаллические сланцы и амфиболиты (PZ₁). *Амазарканский комплекс (AR)*. 11 – диориты и диоритогнейсы. 12 – взрывчатые брекчи. *Рудные жилы*: 13 – золотоносные сульфидно-кварцевые (а) и кварц-молибденитовые (б). 14 – геологические (а) и фациальные (б) границы. 15 – тектонические нарушения (а) и их обозначения (б) – Северо-Давендинское (1), Пограничное (2), Пологое (3), Александровское (4) и Главное (5). 16 – надвиги (а), рудоуправляющие нарушения (б); 17 – рудные участки месторождения Александровское: И – Ивачихинский, Ц – Центральный, В – Восточный, СВ – Северо-Восточный, ВО – Вершина Ороченка; 18 – золоторудные месторождения: 1 – Александровское, 2 – Западное, 3 – Ключевское, 4 – Костромихинское; молибденовые месторождения: 5 – Давендинское, 6 – Алексеевское, 7 – Большекудечинское, 8 – Костромихинское. На врезке: I – Северо-Западный блок, II – Юго-Восточный блок, III – Давендинский блок.

стираний (фиг. 2). Среди пород дайковой серии А.В. Вареником (2014ф¹) описаны гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые диоритовые порфириты, субщелочные лейкократовые гранит-порфиры, плагиоклазовые порфириты, диоритовые порфириты, фельзиты и фельзит-порфиры, аплиты, микродиориты, диабазы, лампрофиры. Опубликованные геохронологические датировки интрузивных пород амуджикано-сретенского комплекса (J₂-K₁) в смежных районах, полученные разнообразными методами, находятся в интервале от 162 до 145 млн лет (Чернышев и др., 2014; Сотников и др., 2006). Эти датировки отвечают времени завершения коллизии Восточно-Сибирского и Монголо-Китайского континентов и связанной с ней орогении и знаменуют вступление территории Восточного Забайкалья в посторогенный (внутриплитный) этап развития (Чернышев и др., 2014).

В пределах Давендинско-Ключевского рудного узла выделяются три геолого-структурных блока – Северо-Западный, Юго-Восточный и Давендинский (фиг. 2б). Северо-Западный блок сложен гранитоидами бичурского комплекса (P₂). Границы между блоками выделены по зонам тектонических нарушений. Судя по разрезу (фиг. 2в), Юго-Восточный и Северо-Западные блоки, где преимущественно локализовано золотое оруденение, являются менее эродированными по сравнению с Давендинским блоком, который вмещает кварц-молибденитовые жилы месторождения Давенда и представляет собой приподнятую горстоподобную структуру (фиг. 2в).

Месторождение Давенда приурочено к одной из ветвей Давенда-Ключевской зоны разломов, к опережающим трещинам которой приурочены жиль-

ные и штокверковые рудные тела (фиг. 2б). Крутопадающие кварц-молибденитовые жилы северо-восточного простирания, сопровождаемые широким ореолом калишпатизации и сульфидизации, локализованы среди гранитоидов олекминского комплекса (PZ₁), прорванных многочисленными дайками амуджикано-сретенского комплекса (J₂₋₃) северо-западного и субширотного простираний (Борисов, 1968).

Александровское месторождение располагается западнее Мо-месторождения Давенда (фиг. 2б; Абрамов и др., 2018). Золотое оруденение представлено серией пирит-кварцевых жил с золотом северо-западного простирания, локализованных среди гранитоидов Бичурского комплекса (P₂) (участок Центральный), а также несколькими участками компактного распространения золотоносных турмалин-пирит-кварцевых (участок Ивачиха), халькопирит-сфалерит-галенит-кварцевых жил (участок Вершина Ороченки) и зон пиритизации в гидротермально измененных диоритах (J₃) (участки Восточный и Северо-Восточный) (фиг. 2б). Золотоносные жилы пространственно тяготеют к дайкам амуджикано-сретенского комплекса, имея с ними близкие элементы залегания.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

Для определения температур фазовых переходов во флюидных включениях применялись методы крио- и термометрии (микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от -196 до +600°C). Изучение состава газовой фазы и определение твердых фаз включений проводилось методом КР-спектроскопии (спектрометр Ramanor U-1000 фирмы JobinYvon, лазер MillenniaProS2 (532 nm), детектор HORIBA JOBIN YVON, г. Новосибирск). Общая концентрация солей в растворах флюидных включений и принадлежность их к той или иной водно-солевой системе определялись по данным криометрии (Борисенко, 1982; Vodnar, Vityk, 1994). Оценка давления среды минералообразования осу-

¹ Вареник А.В. Информационный отчет о промежуточных результатах поисков и оценок на флангах Александровского золоторудного месторождения за 2010-2013гг. ЗАО "Рудник Александровский" (ФГУ НПП "Росгеофонд", Забайкальский филиал ФБУ "ТФГИ по СФО, ЗАО "Рудник Александровский"), Забайкальский Край, N-51-XXV. Поселок Давенда. 2014. 129 с.

Таблица 1. Петрография изученных дайковых пород амуджикано-сретенского комплекса месторождений Александровское и Давенда

№	Привязка	Описание
224	Александровское месторождение, уч. Западный, карьер	Кварцевый диорит-порфир. Минеральный состав: плагиоклаз 75%, биотит 10%, зеленая роговая обманка 5%, кварц 10%. Акцессорные минералы представлены сфеном и апатитом. Структура породы порфириформная, вкрапленники сложены идиоморфными призматическими зернами плагиоклаза и округлыми – кварца, размер вкрапленников до 3 мм. Во вкрапленниках кварца отмечается зональное расположение включений темноцветных минералов. Структура основной массы гипидиоморфная, образована призматическими лейстами плагиоклаза и ксеноморфными зернами кварца размером 0.1–0.2 мм. Из вторичных минералов отмечаются серицит и кальцит
281	»	Гранит-порфир. Светло-серые, серые с розоватым оттенком порфириформные породы с вкрапленниками зонального плагиоклаза (олигоклаз-андезина), калишпата, дымчатого кварца, роговой обманки, биотита размером до 0.5 мм. Вкрапленники распределены весьма неравномерно и составляют от 10 до 30% объема породы. Основная масса имеет микрогранитовую, иногда микропегматитовую структуру и состоит из калишпата 15–20%, плагиоклаза 40%, кварца 33%, редко биотита 0–3%
712	Месторождение Давенда, штольня № 1, отвал	Диоритовый порфирит. Порода состоит из плагиоклаза (80%), роговой обманки, преимущественно замещенной поздними биотитом и актинолитом (15%) и кварца (5%). В качестве акцессорных минералов присутствуют сфен и апатит. Порода имеет порфириформную структуру, размер зерен в основной массе составляет 0.5–2 мм, размер вкрапленников 3–5 мм. Структура основной массы гипидиоморфная, образована идиоморфными призматическими зернами плагиоклаза и ксеноморфными – кварца. Плагиоклаз частично серицитизирован, местами отмечается вторичный эпидот, первичная буря роговая обманка большей частью замещается вторичным зеленым амфиболом и биотитом
716-2	»	Гранит-порфир. Порода с отчетливо выраженной порфириформной структурой. Вкрапленники представлены плагиоклазом (65%), темноцветными минералами (15%), калишпата (10%) и кварцем (10%). Размер вкрапленников от 0.3–0.5 до 3–5 мм, содержание в породе около 25 об. %. Полевые шпаты образуют призматические идиоморфные кристаллы, зерна кварца обычно округлые с оплавленными краями. Основная масса имеет фельзитовую структуру, с размером зерен менее 0.02 мм. Темноцветные минералы представлены биотитом и светло-зеленой роговой обманкой. Биотит частично хлоритизирован, роговая обманка замещается эпидотом, плагиоклаз частично серицитизирован

шествовалась с использованием опубликованных данных *PTX*-состояния систем $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$. При оценке давления и определении других параметров среды минералообразования по микротермометрическим данным изучения флюидных включений использовались программные пакеты *AqSo_NaCl* (Bakker, 2018), *Vx-Tern.exe* (Паинси и др., 2008), а также *ISONOR* (Bakker, 2001) и *FLINCOR* (Brown, 1989).

Элементный состав солевых компонентов растворов включений был определен на основании результатов изучения солевых продуктов декрепитации флюидных включений с помощью электрон-

ного сканирующего микроскопа *Tescan MIRA 3 LMU* (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Декрепитация флюидных включений осуществлялась при их нагревании до температуры, превышающей температуру гомогенизации включений на 50–100°C. Под действием избыточного внутреннего давления флюидные включения теряли герметичность, и растворы, содержащиеся во включениях, по микротрещинам изливались на поверхность образца. При высыхании капель раствора на поверхности пластинок образовывались тонкозернистые солевые агрегаты характерной концентрической формы, которые и служили объектом исследования.

Определение изотопного возраста серицита проведено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Идентификация дайковых пород амуджикано-сретенского комплекса была проведена согласно Петрографическому Кодексу (Петрографический..., 2008) на основе их петрографического описания (табл. 1). Образцы № 281, 716-2 представлены гранит-порфирами, образец № 712 описан как диоритовый порфирит. Образцы рудных жил № 230, 235, 237, 246, 280 отобраны из карьера Александровского месторождения. Образцы руд № 710-713-1 месторождения Давенда были отобраны из отвалов штольни № 1.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

Месторождение Давенда. Рудные жилы месторождения Давенда сложены молочно-белым кварцем, который содержит вкрапленность пирита, молибденита и висмутина. Тонкочешуйчатый молибденит цементирует обломки молочно-белого кварца, развиваясь совместно с мусковитом по его межзерновым границам. Часто наблюдается ассоциация тонкочешуйчатого молибденита с карбонатом (фиг. 3а, б), а также апатитом и монацитом (фиг. 3в). Основная масса молибденита связана с агрегатом мелко- и среднезернистого светло-серого кварца, который отлагается чуть позже основной жильной массы молочно-белого кварца. В составе руд месторождения отмечался вольфрамит, образующий мелкопластинчатые агрегаты в кварце (Юргенсон, 2008, Юргенсон и др., 2016).

В кварце постоянно присутствуют игольчатый турмалин, скопления пирита, халькопирита, шелита, с которыми ассоциируют галенит, сфалерит, блеклая руда, висмутин, тетрадимит, эмплектит, самородное золото. Халькопирит часто образует сростания с борнитом, который содержит мелкую вкрапленность халькозина и дигенита (фиг. 3г). Верхние интервалы кварцевых жил обогащены самородным золотом (фиг. 3д), где оно ассоциирует с блеклой рудой, халькопиритом и минералами висмута и теллура (гуанохуатит, висмутин, эмплектит, тетрадимит). Содержание золота на верхних горизонтах жилы № 8/9 варьирует от 89 до 1817 г/т. Ниже по падению жилы содержание Au падает до 13.8 г/т, и с глубиной уменьшается до 6.8–2.4 г/т, что указывает на вертикальную эндогенную зональность оруденения (Юргенсон и др., 2016).

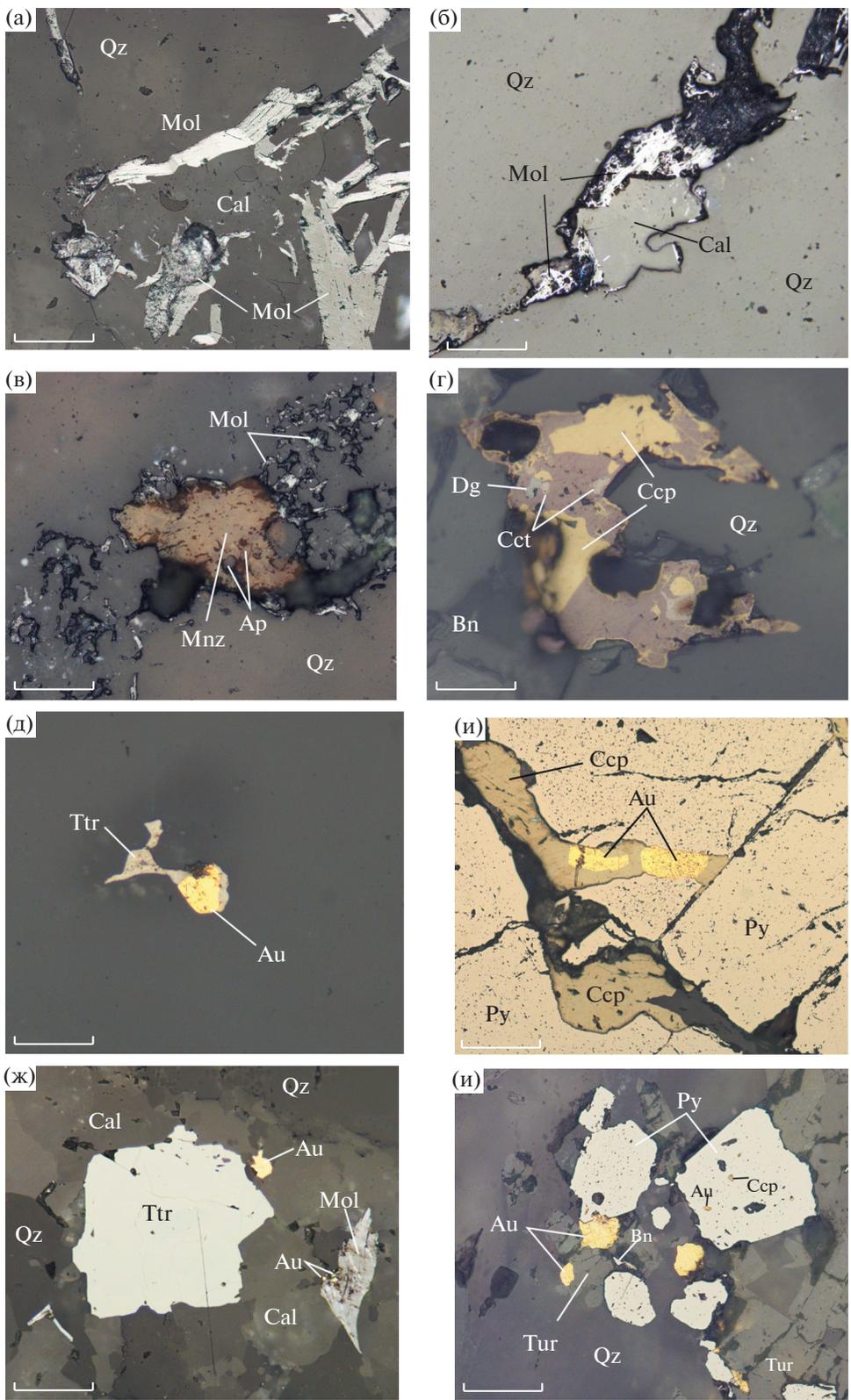
Месторождение Александровское. Наиболее распространенным рудным минералом золотоносных кварцевых жил месторождения Александровское является пирит. Второстепенные минералы представлены халькопиритом, борнитом, молибдени-

том (фиг. 3б), висмутином, тетрадимитом, теллуровисмутином, тетраэдритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом и золотом. Реже в рудах встречаются касситерит, самородное серебро, пирротин, виттихенит, марказит, буланжерит, айкинит и гессит. Золото отмечается в виде мелких включений в кварце, образует сростания с пиритом, халькопиритом (фиг. 3е) и турмалином (фиг. 3и). В интерстициях в кварце самородное золото ассоциирует с карбонатом, тетраэдритом и молибденитом (фиг. 3ж). Пробность золота изменяется от 850 до 922‰ (Абрамов и др., 2018). В рудах месторождений Александровское и Давенда присутствует REE-минерализация – апатит, монацит, ксенотим, рабдофан и черчит (Абрамов и др., 2018).

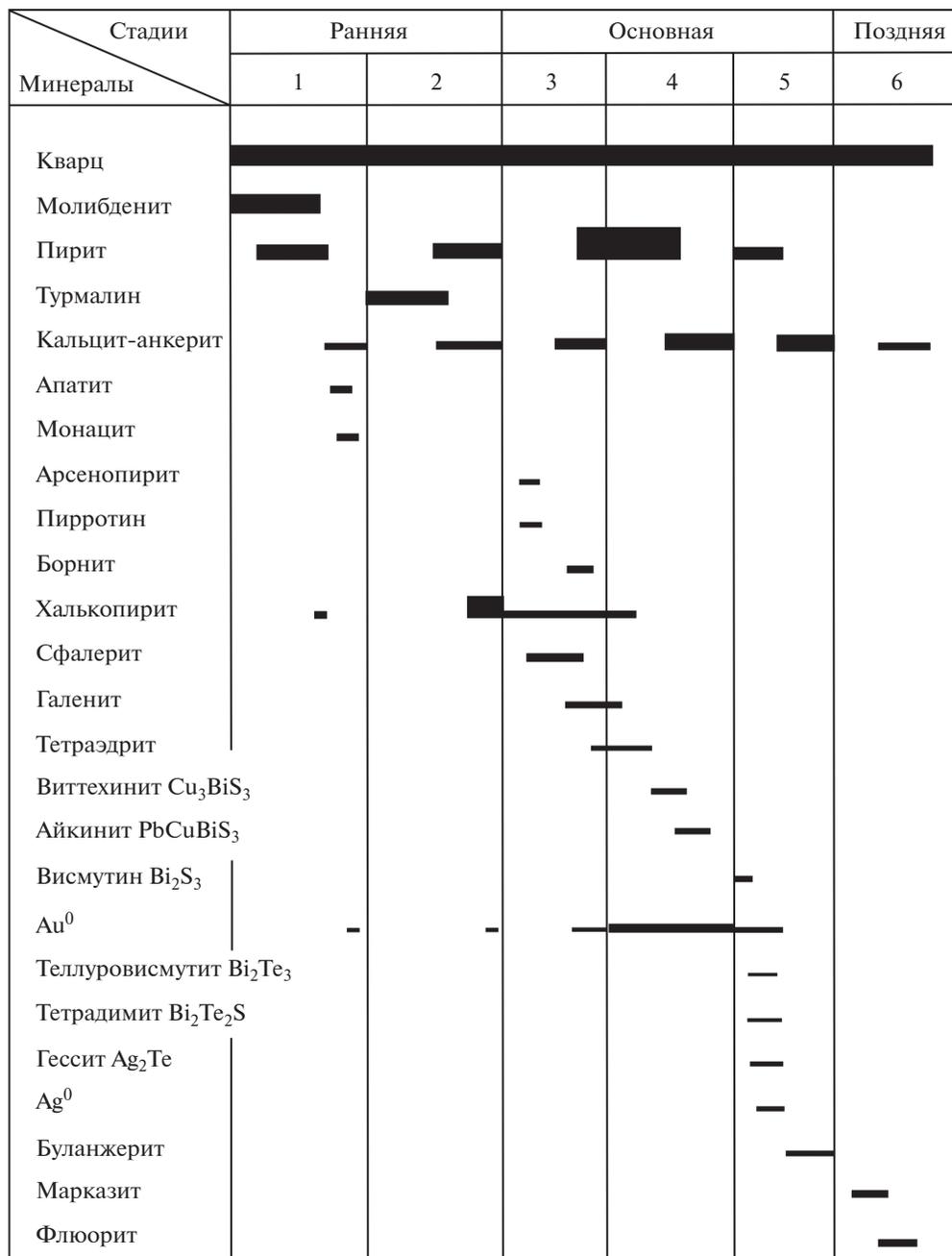
Последовательность формирования минеральных ассоциаций на месторождении Александровское близка к стадийности рудообразования, установленной на других золоторудных месторождениях региона: Дарасун, Теремкинское, Уконинское, Казаково-Ключевское и др., относимых к дарасунскому типу (Спиридонов и др., 2006; Юргенсон, 1995; Прокофьев, Зорина, 1996; Криволуцкая и др., 1995; Федорчук и др., 1995). Рудные жилы Александровского месторождения формировались в несколько стадий. В раннюю стадию были образованы молибденит-кварцевая (1) и кварц-турмалиновая ассоциация (2), в основную – золото-кварц-полиметаллическая (3), пирит-кварцевая с золотом (4) и висмутин-кварцевая (5) ассоциации. Поздняя стадия представлена кварц-карбонатной (6) ассоциацией (фиг. 4).

Богатые золотом руды Александровского месторождения представлены пирит-кварцевой минеральной ассоциацией. В составе рудных жил Мо-порфирового месторождения Давенда, доминируют молибденит-кварцевая и отчасти кварц-турмалиновая ассоциации. Последовательность формирования рудных ассоциаций на месторождениях Александровское и Давенда в целом идентична. Среди метасоматических околорудных изменений месторождений Александровское и Давенда наиболее распространены: ранняя стадия – калишпатизация, пропицитизация, турмалинизация, окварцевание; основная стадия – хлоритизация, березитизация; поздняя стадия – гематитизация, карбонатизация и аргиллизация.

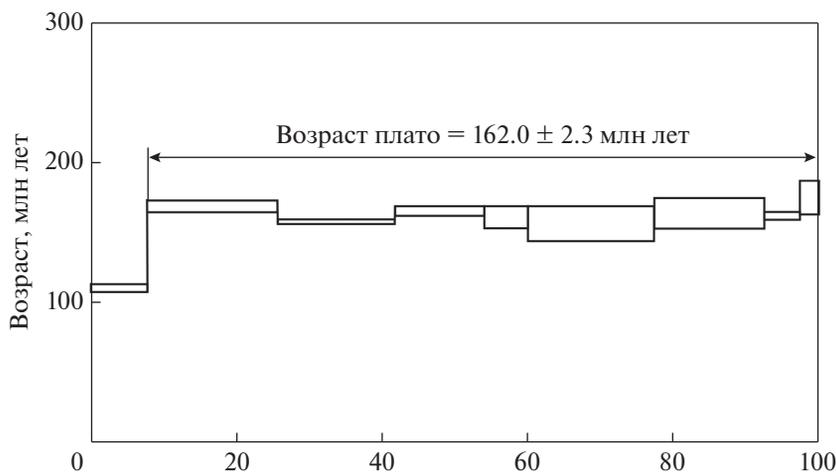
Возраст минерализации основной стадии с золотом Александровского месторождения ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод по серициту) может быть оценен в 162 ± 2.3 млн лет (фиг. 5). Это значение близко к возрасту пород амуджикано-сретенского комплекса, а также калишпатовых метасоматитов Дарасунского месторождения 159.6 ± 1.5 млн лет (K–Ar) (Чернышев и др., 2015), калишпатизированных пород месторождения Жирекен 160.9 ± 1.7 и 159.2 ± 1.0 млн лет (Ar–Ar) и его кварц-молибденито-



Фиг. 3. Взаимоотношения рудных минералов (масштабная линейка 200 мкм). *Месторождение Давенда:* а – пластинчатые сростки кристаллов молибденита и его тонкочешуйчатого агрегата (Mol) в жильном кварце (Qz); б – парагенезис тонкочешуйчатого молибденита и карбоната (Cal) в кварце (обр. 713-1); в – ассоциация тонкочешуйчатого молибденита (Mol), апатита (Ap) и монацита (Mnz) (обр. 713-1) в жильном кварце (Qz); г – сросток борнита (Bn) и халькопирита (Csp) в жильном кварце, в борните наблюдаются халькопирит (Csp), образующий структуру распада твердого раствора и мелкую вкрапленность, а также мелкие зерна и их сростки халькозина (Cst) и дигенита (Dg) (обр. 710); д – тетраэдрит (Ttr) и самородное золото (Au⁰) в интерстициях зерен жильного кварца (обр. 710-1). *Месторождение Александровское:* б – мелкопластинчатые кристаллы молибденита (Mol), образующие вкрапленность в кварце (Qz) и ассоциирующие с карбонатом (Cal) (обр. 237); е – катаклазированный пирит (Py) ранней стадии, трещины заполнены халькопиритом (Csp), содержащим округлые вкрапления самородного золота (Au⁰) (обр. 280); ж – тетраэдрит (Ttr), молибденит (Mol) и самородное золото (Au⁰) в карбонате (Cal), который заполняет пустотку в жильном кварце (Qz), (обр. 246); и – кристаллы пирита (Py) в сростании с турмалином (Tur) в ассоциации с самородным золотом (Au⁰) и борнитом (Bn), пирит содержит тонкую вкрапленность халькопирита (Csp) и самородного золота (обр. 280).



Фиг. 4. Обобщенная схема последовательности кристаллизации минералов в рудных жилах месторождений Александровское и Давенда (составлено с использованием данных: Прокофьев и др., 2000, Юргенсон, 2008, Юргенсон и др., 2016, А.В. Вареник (2014ф)). Минеральные ассоциации руд: 1 – молибденит-кварцевая; 2 – кварц-турмалиновая; 3 – золото-кварц-полиметаллическая; 4 – пирит-кварцевая с золотом; 5 – висмутин-кварцевая; 6 – кварц-карбонатная.



Фиг. 5. Возраст ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод) серицита из зальбанда золотоносной кварц-пиритовой жилы с вкрапленностью молибденита (обр. 237) Александровского месторождения.

вых жил 163 ± 1 и 162 ± 1 млн лет (Re-Os) (Сотников и др., 2006; Берзина и др., 2015).

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ РУДНЫХ ЖИЛ И В МИНЕРАЛАХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

В кварце рудных жил месторождений Александровское (кварц-пиритовая ассоциация с золотом) и Давенда (светло-серый кварц с молибденитом) присутствуют мелкие (20–5 мкм) флюидные включения, которые можно разделить на несколько типов по фазовому наполнению и объемному соотношению преобладающих в них фаз:

1) однофазные существенно газовые флюидные включения (V_1), в которых не видно каемки раствора (фиг. ба);

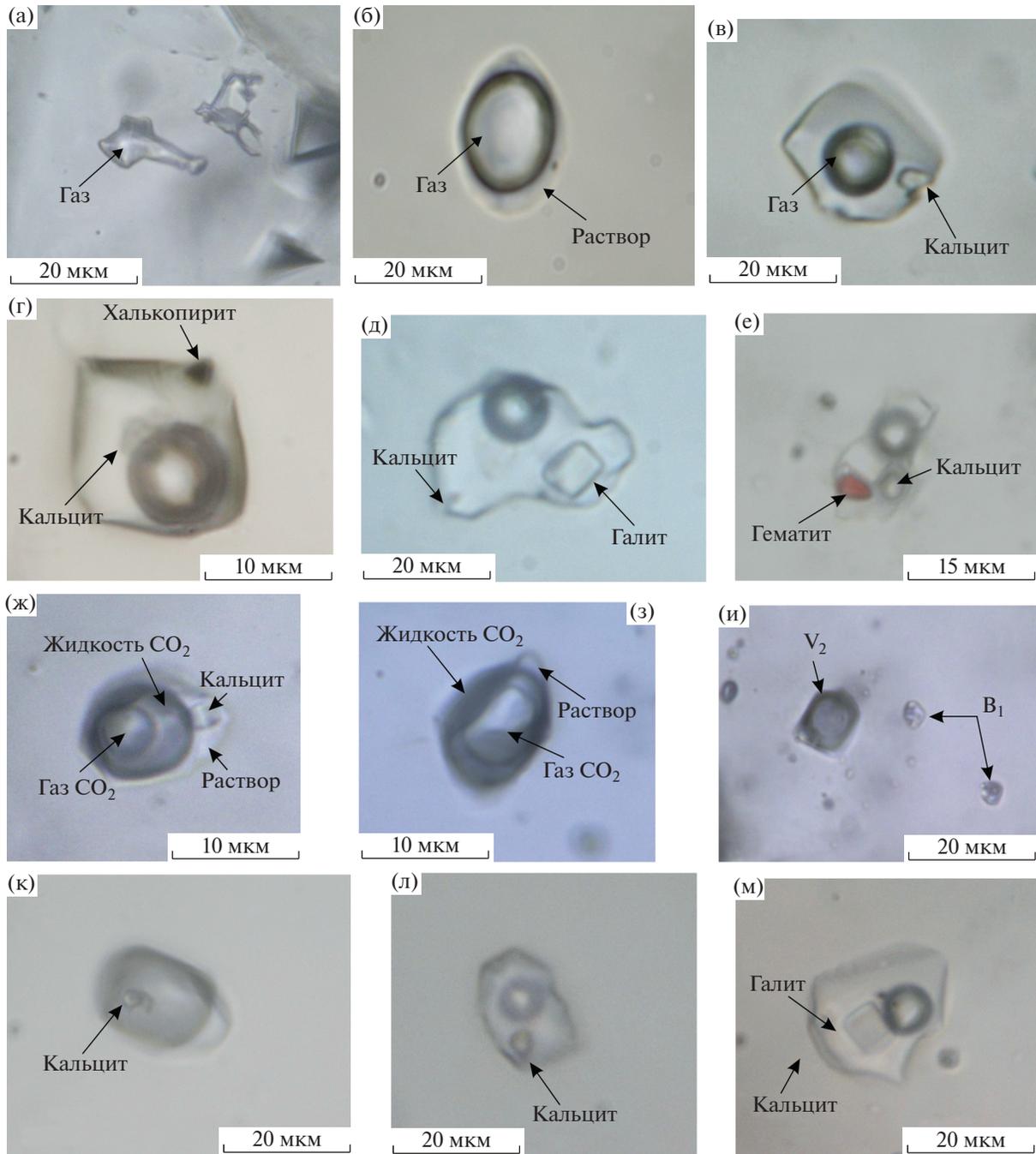
2) двухфазные флюидные включения (V_2), содержащие преимущественно газовую фазу (95–90 объемных %, здесь и дальше в описании включений) и кайму водно-солевого раствора, в которой часто присутствует твердая анизотропная фаза кальцита незначительного размера – (фиг. бб, ж);

3) трехфазные флюидные включения (V_3), содержащие преимущественно газовую фазу и жидкую CO_2 (газ + жидкая CO_2 – 90–95%), а также кайму водно-солевого раствора (фиг. б);

4) двухфазные флюидные включения (L_1 и L_2), содержащие пузырь газа (20–30%) и водно-солевой раствор. В фазовом составе этих включений обычно присутствуют несколько мельчайших прозрачных анизотропных и непрозрачных твердых фаз, прилипших к стенкам вакуолей, либо флотированных пузырем газа. Двухфазные включения L_1 и L_2 характеризуются близким фазовым составом, но различаются по температуре плавления эвтектики (см. ниже) (фиг. бв, г, з);

5) трехфазные флюидные включения (B_1 и B_2) содержат газ (10–30%), кубический кристалл галита (40–25%) и водно-солевой раствор. Эти включения также содержат мелкие прозрачные анизотропные и непрозрачные твердые фазы (фиг. бд). Визуально уверенно диагностируется гематит, присутствующий в составе трехфазных включений в виде полупрозрачных гексагональных кристаллов, окрашенных в красно-коричневые тона (фиг. бд, е, и). В трехфазных включениях (B_2) галит при нагревании растворяется при более высоких температурах, чем газ. Визуально включения B_1 и B_2 не различимы. Во флюидных включениях всех типов, кроме преобладающих фаз, присутствуют прозрачные анизотропные и непрозрачные твердые фазы субмикронного размера (от 2 мкм и менее). Мелкие прозрачные и непрозрачные твердые фазы характеризуются разными объемными соотношениями и могут быть ксеногенными.

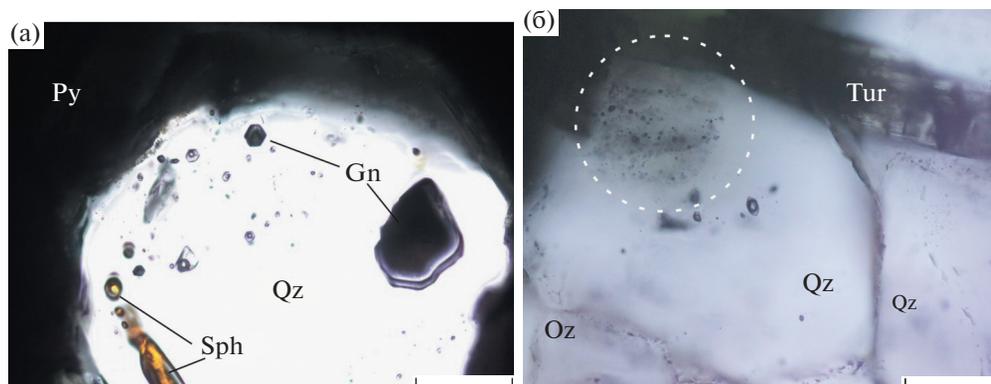
Кварц рудных жил месторождений представлен плотным сливным агрегатом мелких зерен. Кристаллическую огранку имеют только индивиды кварца в полостях, заполненных карбонатом. Только в некоторых из зерен кварца по периферии и в центре наблюдаются фрагменты зон роста, которые трассируются первичными существенно газовыми (V_{1-2}) и двухфазными флюидными включениями (тип L_{1-2}) прихотливой формы. Жильный кварц месторождений Александровское и Давенда характеризуется идентичным характером распределения первичных, псевдоторичных и вторичных флюидных включений. К первичным включениям, не приуроченным к зонам роста, могут быть отнесены флюидные включения, располагающиеся обособлено от систем трещин, либо образующие компактные “роевидные” группы из нескольких включений в центральных частях зерен кварца (фиг. 7).



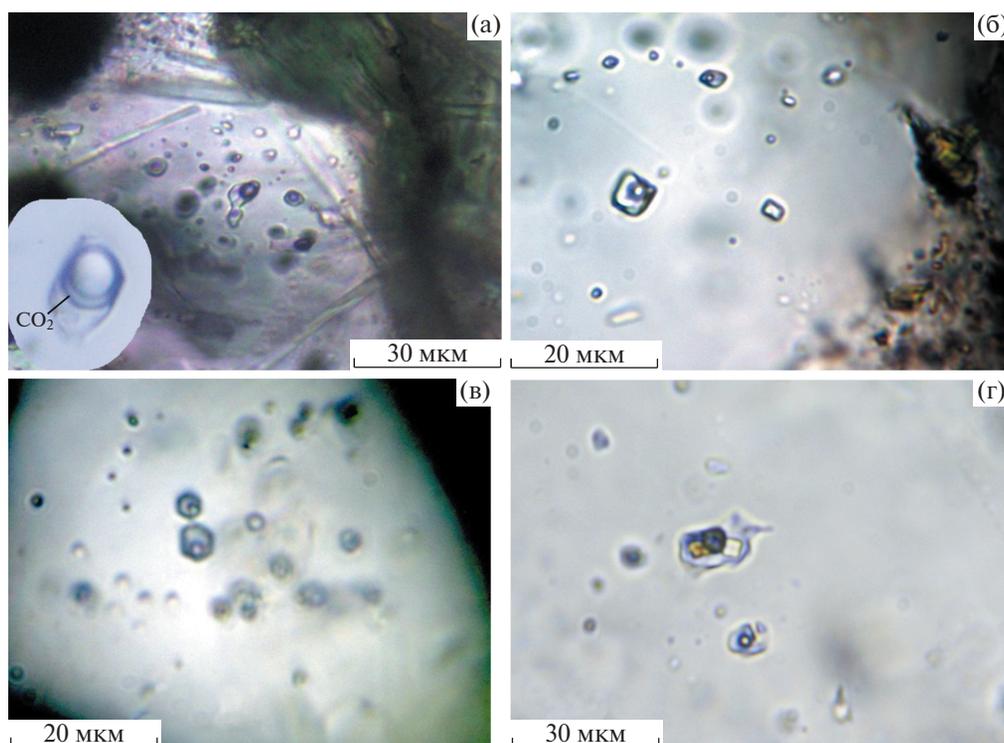
Фиг. 6. Флюидные включения в кварце рудных жил месторождения Александровское. Газовое включение, тип V₁ (а); двухфазное включение, тип V₂ (б); двухфазные включения с кальцитом, тип L₁ и L₂ (в), двухфазное включение с твердыми фазами кальцита и халькопирита тип L₁ (г); трехфазные включения, тип V_{1,2} с галитом и маленькой фазой кальцита (д), а также с гематитом (е). Включения с жидкой CO₂, тип V₃ (ж, з) и ассоциация CO₂-включений (V₃) с трехфазными включениями (B₁) (и). Месторождение Давенда: газовое включение, тип V₂ с микроскопическими твердыми фазами (к); двухфазное включение с кальцитом, тип L₂ (л); трехфазное включение с галитом и кальцитом, тип B_{1,2} (м).

Большинство флюидных включений образуют шлейфы по “залеченным” трещинам и являются вторичными или псевдвторичными. В количественном отношении в кварце преобладают двухфазные флюидные включения (L₁₋₂). Трехфазные

включения с галитом (B₁₋₂) в жильном кварце гораздо менее распространены и приурочены обычно к центральным частям зерен кварца, где располагаются обособленно, либо образуют “роевидные” скопления. Флюидные включения с



Фиг. 7. Первичные двухфазные включения (тип L_1) в кварце золото-кварц-полиметаллической минеральной ассоциации (основная стадия, месторождение Александровское), роевидное скопление первичных флюидных включений (типы L_2 и B_1) в кварце и первичные существенно газовые включения (тип 2A), ранняя стадия, месторождение Давенда. Масштабная линейка 100 мкм.



Фиг. 8. Флюидные включения (V_2 , V_3 , L_1) в кварце кварцевого диорит-порфира (а) и включения (L_2) гранит-порфира (б) Александровского месторождения. Двухфазные флюидные включения (L_1) в апатите диоритового порфирита (в), флюидное включение с галитом и гематитом (B_2) в кварце гранит-порфира (г) месторождения Давенда.

жидкой CO_2 (V_3) в кварце встречены только в двух образцах с месторождения Александровское.

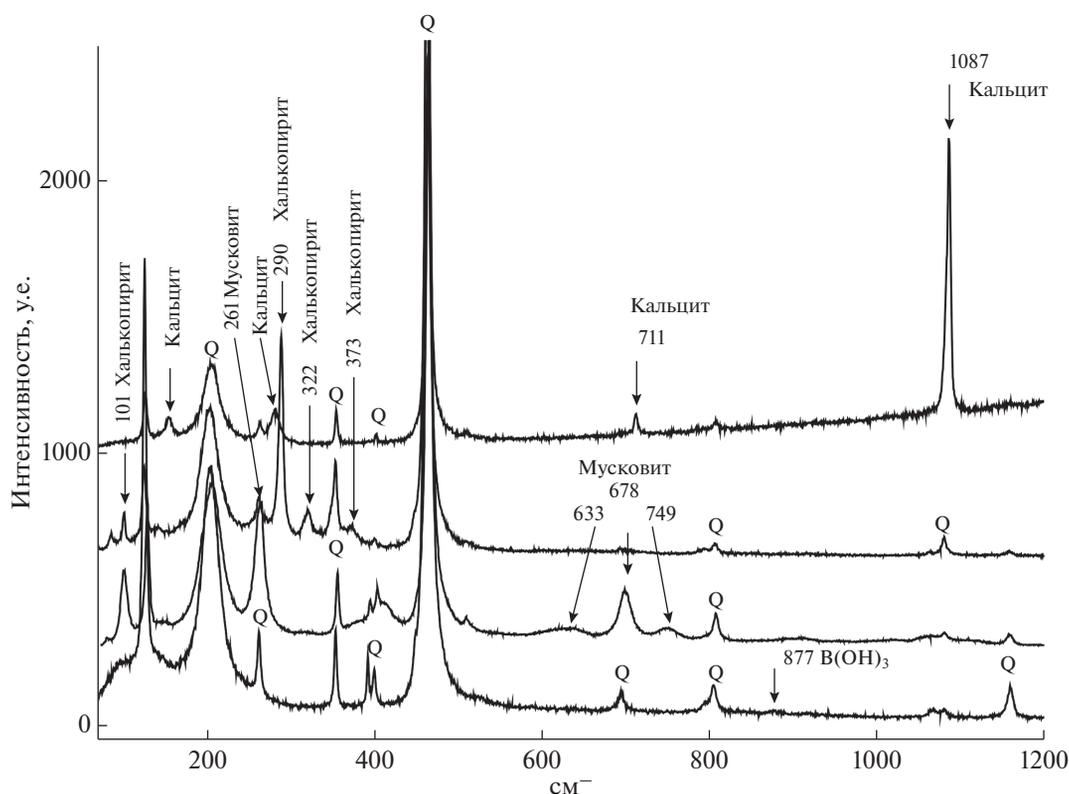
Порфировые вкрапленники кварца в кварцевом диорит-порфире (обр. 224), содержат двухфазные флюидные включения (тип L_1), которые располагаются беспорядочно, а также включения с жидкой CO_2 (V_3), которые трассируют трещины и характеризуются переменным соотношением

объемов отдельных фаз (фиг. 8а). В аксессуарном апатите диоритового порфирита (обр. 712) наблюдаются первичные двухфазные включения (L_1), равномерно распределенные в объеме кристалла и содержащие пузырь газа (25–30%) и водно-солевой раствор (фиг. 8в). Вкрапленники кварца в гранит-порфире (обр. 281) содержат двухфазные включения (L_2), газовый пузырь занимает 35–30% включения (фиг. 8б). Вкрапленники кварца в гра-

Таблица 2. Результаты микротермометрического исследования флюидных включений в кварце рудных жил и даек месторождений Александровское и Давенда

Образец* (Au г/т)	Стадия**	Тип	$T_{\text{гом. газа, } ^\circ\text{C}}$	$T_{\text{эвтектики, } ^\circ\text{C}}$	$T_{\text{пл. льда, } ^\circ\text{C}}$	$T_{\text{пл. NaCl, } ^\circ\text{C}}$	Соленость (в мас. % NaCl-экв.)
237 (13.0)	1-2	L ₂	396–380	–37	–4.6		7.3
237		B ₁	348–340	–42		217–220	33.5–33
237		L ₂	402–334	–40...–38	–15.6		19.4
237		L ₂ ¹	210–195	–49	–20		22.6
280 (0.58)	1-2	L ₂	170	–37.5 (–77)***	–5.3...–6		7.8
280		L ₂	195	–38 (–78)	–3.3...–1.6		4.8–2.6
280		L ₂	280–237	–38	–15...–16		19.4
280		L ₂	387–375	–36	–3.2		5.2
280		B ₁	356–345	–42		237–210	33.9–33.5
246	1	L ₂	260–220	–37	–15...–14		18.6
246 (0.01)		B ₁	346–325	–42	–	228–215	33.7–33.6
230 (0.043)	2	L ₁	290–175	–55	–11...–7		15–10.6
230		L ₂	270–290	–23...–25	–4.5...–4		7.2–6.5
232 (1.0)		L ₂	243–235	–37	–4		6.4
234 (0.70)		L ₂	340	–38	–5.8		8.9
234	2-3	L ₁	175–160	–55...–49 (–77)	–1.6		2.5
235 (0.014)	2-3	L ₁	158–123	–55...–49	–4.2		6.7
224		L ₁	360–340	–55...–52 (–77)	–8.3		12.2
258		L ₁	320–280	–54...–55	–19...–12		22–16
714	1	L ₂	320–290	–41...–38	–19...–18		21.6–20.9
714		V ₂	438–403	–23...–21.2	–2.1...–1.2		3–1.7
714		B ₁	399–390	–31...–28		330–325	39.8–39.2
714		B ₂	260–230	–31...–28		335–284	37.4
710-2	1-2	L ₂	200–156	–38...–37	–4.7		7.5
713-1	1	V ₂	410–395	–21.2	–1.2		
713-1	1	L ₂	355–347	–45...–38	–21.1...–20.5		23.2–22.6
713-1	1	B ₂	220–182	–45		380–310	45.3–38.9
716-2		L ₂	312–324	–37	–2.5...–1.9		4–2
716-2		B ₂	220–180	–42		250–220	34.7–32.9
712 (апатит)		L ₁	277–170	–55...–49	–12...–13.5		16–16.5

Примечание. * – Александровское месторождение: пирит-кварцевые жилы с золотом (237, 280, 246, 230, 232, 234, 235, 320), кварцевый диорит-порфир (224), гранит-порфир (281); Давендинское месторождение: кварц-молибденитовые жилы (714, 710-2, 714, 713-1), гранит-порфир (716-2), диоритовый порфирит (712). ** – стадии рудообразования (см. фиг. 4): 1 – ранняя, 2 – основная, 3 – поздняя. *** – в скобках дана температура плавления эвтектики замороженного раствора, обусловленного метастабильным состоянием замороженного раствора, связанного с присутствием CaCl₂. Сокращения: гом. – гомогенизация; пл. – плавление.



Фиг. 9. КР-спектры мелких твердых фаз, обнаруженных в составе флюидных включений Александровского месторождения. Q – спектральные линии кварца.

нит-порфире (обр. 716-2, фиг. 8г) содержат двухфазные включения (L_2) и трехфазные включения с галитом (B_2).

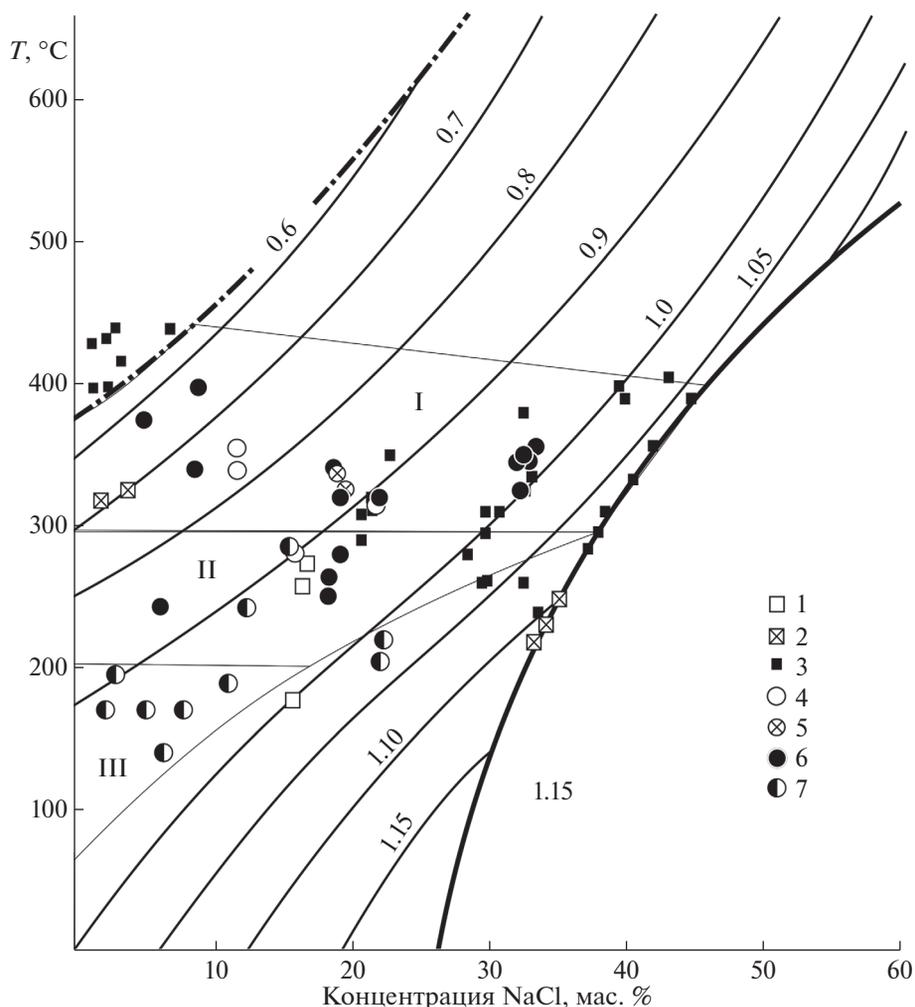
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ РУДНЫХ ЖИЛ И В МИНЕРАЛАХ ПОРОД АМУДЖИКАНО-СРЕТЕНСКОГО КОМПЛЕКСА

Александровское месторождение

В кварце пирит-кварцевой с золотом минеральной ассоциации замороженные растворы двухфазных включений характеризуются температурой плавления эвтектики в трех интервалах от -78 до -77°C , от -55 до -49°C (L_1) и от -38 до -36°C (L_2). Растворы двухфазных включений (L_1) с пониженными температурами плавления эвтектики в интервалах от -55 до -49°C относятся к водно-солевой системе $\text{CaCl}_2\text{--NaCl--H}_2\text{O}$ с примесью KCl (Борисенко, 1982; Редер, 1987). Более низкие температуры плавления эвтектики растворов от -78 до -77°C связаны не с присутствием в составе флюидных включений LiCl , а с метастабильным состоянием, характерным для водно-солевой системы $\text{CaCl}_2\text{--NaCl--H}_2\text{O}$ при низких температурах (Davis et al., 1990; Samson, Walker 2000). В таких двухфазных включениях лед

плавится в интервале от -20 до -1.6°C , и они содержат растворы с концентрацией от 22.6 до 2.6 мас. % NaCl -экв. Гомогенизация таких включений происходит в широком интервале температуры от 123 до 290°C (табл. 2).

Двухфазные включения (L_2) с температурами плавления эвтектики в интервале от -38 до -36°C содержат растворы, которые относятся к водно-солевой системе $\text{NaCl--KCl--H}_2\text{O}$ с вероятным присутствием K_2CO_3 и FeCl_3 в качестве примесей, понижающих температуру плавления эвтектики (Борисенко, 1982; Реддер, 1987, Боровиков и др., 2002). Присутствие в составе включений MgCl_2 ($\text{MgCl}_2\text{--KCl--H}_2\text{O}$ эвтектика = -37°C) маловероятно, так как опубликованные многочисленные данные анализа индивидуальных флюидных включений методом LA-ICP-MS свидетельствуют об отсутствии заметных количеств Mg в составе гидротермальных флюидов порфировых месторождений (Williams-Jones and Heinrich, 2005 и многие другие). Плавление льда в замороженных включениях происходит в интервале температуры от -16 до -2.3°C . Общая концентрация солей варьирует от 19.4 до 2.5 мас. % NaCl -экв. Гомогенизация включений происходит в интервале от 402 до 237°C . В образцах 280, 234 в двухфазных флюидных включениях были зафиксированы первые



Фиг. 10. Диаграмма состояния водно-солевой системы NaCl–H₂O, штрих-пунктирная линия – кривая равновесия VL, тонкие сплошные линии – изохоры, жирная сплошная линия – кривая равновесия SL. Показаны поля параметров ранней (I), основной (II) и поздней (III) стадий рудообразования на месторождении Дарасун по (Прокофьев, Зорина, 1996). Месторождение Давенда: 1 – диоритовый порфирит (включения В₁), 2 – гранит-порфиры (включения L₂ и В₁), 3 – кварц-молибденитовые жилы. Месторождение Александровское: 4 – кварцевый диорит-порфир (включения L₁), 5 – гранит-порфир (включения L₂ и В₂), 6 – золотосные пирит-кварцевые жилы (Na–K–Fe-включения, тип L₂ и В₁), 7 – Na–Ca-включения (тип L₁).

признаки плавления на интервале температуры –78...–77°C, которое не прогрессировало вплоть до интервала –38...–36°C. Подобное поведение замороженных включений можно связать с метастабильным состоянием охлажденного раствора в присутствии примеси CaCl₂ (табл. 2).

В трехфазных включениях (В₁) галит растворяется в интервале температур от 237 до 217°C, газ гомогенизируется в интервале температур от 356 до 340°C. Плавление эвтектики замороженных растворов трехфазных включений наблюдается в интервале температур от –42 до –40°C. Этот интервал близок к температуре плавления эвтектики в водно-солевой системе NaCl–FeCl₃–H₂O, что указывает на возможное присутствие примеси хлоридов Fe в составе растворов (Боро-

виков и др., 2002; Борисенко и др., 1997). Общая концентрация солей в трехфазных включениях колеблется от 33.9 до 33 мас. % NaCl-экв. По данным КР-спектроскопии, газовая фаза флюидных включений в кварце Александровского месторождения содержит CO₂ от 98 до 90.1 и N₂ от 11.7 до 2 мол. %. Глубокое охлаждение до –197°C газовых включений (типы V₁₋₂) не выявило в них сжижения низкокипящих газов или кристаллизации твердой CO₂, что служит указанием на низкую плотность газовой фазы. По данным КР-спектроскопии, мелкие прозрачные анизотропные твердые фазы двухфазных и трехфазных включений в кварце рудных жил представлены кальцитом и мусковитом, а также непрозрачным халькопиритом,

в растворе включения обнаружена спектральная полоса $\text{B}(\text{OH})_2$ (фиг. 9).

Полученные данные изучения флюидных включений в минералах руд месторождения Александровское в целом близки к результатам детального исследования (Прокофьев, Зорина, 1996) флюидного режима образования эталонного для Восточного Забайкалья месторождения Дарасун (фиг. 10). Надо отметить, что рудообразующие флюиды месторождения Дарасун также представлены двумя типами, различными по солевого составу, судя по двум разным интервалам температуры плавления гранодиорит-порфиров амуджикано-сретенского комплекса: $-62...-49^\circ\text{C}$ и $-39...-32^\circ\text{C}$ (Прокофьев, Зорина, 1996).

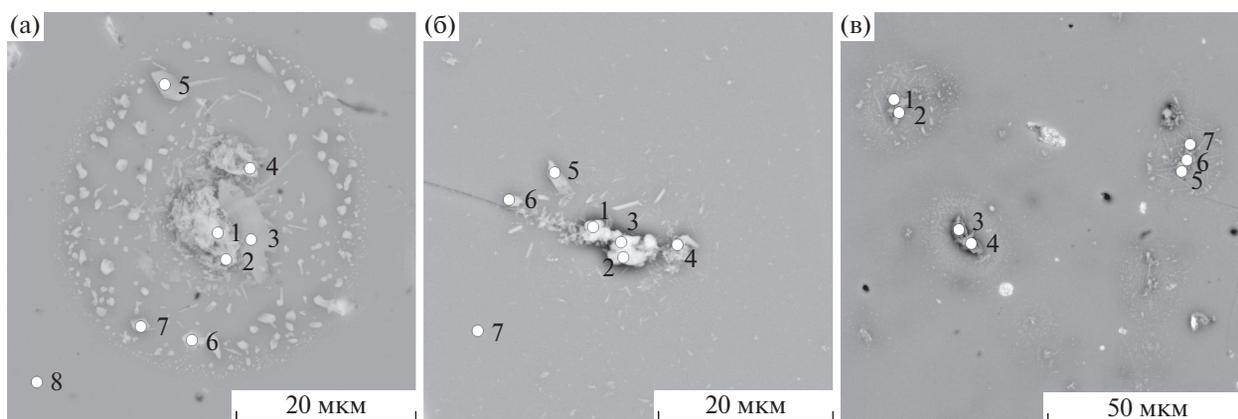
Флюидные включения с жидкой CO_2 . Включения с жидкой CO_2 (V_3) в кварце руд Александровского месторождения были обнаружены и изучены в пробе с повышенным содержанием Au (образец 280, фиг. бк, л, м), а также во вкрапленниках кварца диоритового порфирита (обр. 224, фиг. 6). В целом CO_2 -включения не имеют большого распространения и обладают небольшими размерами (15–5 мкм). Их фазовый состав: газ CO_2 + жидкость CO_2 + водно-солевой раствор, CO_2 занимает 98–90% объема включения. Плавление CO_2 происходит при температуре $-56.7...-57^\circ\text{C}$. Наблюдаются два типа включений с различной плотностью CO_2 : в одних гомогенизация CO_2 происходит в жидкую фазу при температуре от $+16.7$ до $+30^\circ\text{C}$ ($0.81-0.72$ г/см³), в других CO_2 гомогенизируется при температуре от $+24$ до $+31^\circ\text{C}$ в газовую фазу ($0.42-0.24$ г/см³). CO_2 -включения большой плотности располагаются в кварце обособленно. Обычно они не приурочены к шлейфам вторичных двухфазных включений в залеченных трещинах и часто находятся в ассоциации с трехфазными флюидными включениями с галитом, что может служить указанием на гетерофазное состояние флюида. Низкоплотные CO_2 -включения также иногда встречаются обособленно, но чаще такие включения приурочены к системам залеченных трещин. Включения с CO_2 обычно содержат кристаллик кальцита в качестве твердой фазы. В плотных CO_2 -включениях иногда присутствует кубик галита в каемке раствора. При нагревании включения с плотной CO_2 декрепитируют при температуре выше 380°C , частично гомогенизируясь в газ. Малоплотные CO_2 -включения гомогенизируются в газ при температуре от 380 до 410°C . В трех случаях удалось определить температуру плавления эвтектики раствора в CO_2 -включениях, которая оказалась близкой к системе $\text{CaCl}_2-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ и составила -50.5°C (Борисенко, 1982).

Кварцевые диориты и гранит-порфиры. Кварцевые вкрапленники в кварцевом диорите (образец 224), содержат вторичные и псевдвторич-

ные двухфазные включения (L_1). Гомогенизация двухфазных включений происходит в интервале температур от 360 до 340°C . Плавление эвтектики замороженных растворов двухфазных включений отчетливо наблюдается при температуре -77°C , резкое ускорение плавления льда происходит при $-55...-52^\circ\text{C}$. Общая концентрация солей в растворах включений колеблется от 19.6 до 10 мас. % NaCl -экв. (табл. 1). Жидкая CO_2 , наблюдаемая в газовых включениях (V_3), плавится при температуре -57.6°C и гомогенизируется в интервале температуры от $+30$ до $+31^\circ\text{C}$ в газовую или при $+16.7...+17^\circ\text{C}$ в жидкую фазу. Растворы включений по составу преобладающих компонентов относятся к водно-солевой системе $\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$. По данным КР-спектроскопии, газовая фаза флюидных включений (V_3 и L_1) в кварце кварцевого диорита Александровского месторождения (образец 224) содержат преимущественно CO_2 с примесью N_2 и H_2S . Реже встречаются существенно газовые включения (V_1), содержащие только N_2 (100 мольных %). Кварцевые вкрапленники гранит-порфиров (образец 281) содержат вторичные и псевдо-вторичные двухфазные включения (L_2), гомогенизирующиеся при температуре от 345 до 320°C и характеризующиеся температурой плавления эвтектики $-45...-38^\circ\text{C}$. Плавление льда в этих включениях происходит в интервале температуры от -16 до -14.5°C . Растворы включений можно отнести к водно-солевой системе $\text{NaCl}-\text{FeCl}_3-\text{H}_2\text{O}$ с вероятным присутствием примесей FeCl_2 и KCl (Борисенко, 1982; Боровиков и др., 2002). Газовая фаза двухфазных включений в кварце гранит-порфиров является малоплотной – не сжижается и не конденсируется при охлаждении и, по данным КР-спектроскопии, представлена только CO_2 .

Месторождение Давенда

Изучены флюидные включения в кварце молибденит-кварцевой минеральной ассоциации. Существенно газовые флюидные включения (V_2) гомогенизируются в газовую фазу в интервале температуры $438-395^\circ\text{C}$, эвтектика растворов плавится при $-23...-21.2^\circ\text{C}$, плавление льда происходит при $-2.1...-1.2^\circ\text{C}$. Концентрация растворов составляет 3–1.7 мас. % NaCl -экв., состав относится к водно-солевой системе $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$. Гомогенизация двухфазных включений (L_2) происходит в интервале от 256 до 260°C . Температура плавления эвтектики замороженных растворов двухфазных флюидных включений (L_2) фиксируется в интервале температуры от -45 до -38°C (табл. 2). Двухфазные флюидные включения (L_2) содержат растворы с общей концентрацией солей от 21 до 7.5 мас. % NaCl -экв. Состав растворов определяется NaCl и примесями солей, среди кото-



Фиг. 11. Микрофотографии характерных продуктов декрепитации флюидных включений, полученных на поверхности полированных пластинок из жильного кварца, в отраженных электронах в образцах рудных жил месторождений Давенда (а) и Александровское (б и в). Номера точек анализа на фотографиях соответствуют номерам анализов в табл. 2.

рых, вероятнее всего, можно предполагать K_2CO_3 , KCl и $FeCl_3$.

В трехфазных включениях (B_1) растворение галита происходит при температуре от 364 до 325°C, газ гомогенизируется при температуре от 405 до 390°C, общая концентрация колеблется от 43.2 до 39.6 мас. % $NaCl$ -экв. В части высококонцентрированных трехфазных включений (B_2) гомогенизация газа происходит раньше растворения галита в интервале температуры от 260 до 182°C, растворение галита происходит при температуре 380–284°C. Концентрация солей в таких трехфазных флюидных включениях колеблется от 45.3 до 35.2 мас. % $NaCl$ -экв. (табл. 2). Температура плавления эвтектики замороженных растворов многофазных флюидных включений визуальнo фиксируется в интервале от –45 до –28°C. Состав высококонцентрированных растворов определяется $NaCl$, а также вероятными примесями KCl и $FeCl_3$. В кварце рудных жил месторождения Давенда не были обнаружены флюидные включения с растворами, характеризующимися пониженными температурами плавления эвтектики, также не обнаружены включения с плотной CO_2 .

По данным КР-спектроскопии, газовая фаза флюидных включений в кварце рудных жил Мо-порфирового месторождения Давенда повсеместно представлена только CO_2 без примеси N_2 и других газов. Мелкие прозрачные анизотропные твердые фазы газовых, двухфазных и трехфазных включений ($V_{1,2}$, L_2 , $B_{1,2}$) в кварце рудных жил месторождения представлены кальцитом и мусковитом, также присутствует фаза непрозрачного халькопирита. Твердая фаза $CaCO_3$ испытывает частичное растворение при выдержке препарата в течении 8–10 ч при температуре, на 50°C превышающей температуру гомогенизации включения, что указывает на вероятное присут-

ствии в растворах включений ионов Ca^{2+} и CO_3^{2-} при высокой температуре.

Диорит-порфирит и гранит-порфир. В апатите диорит-порфирита (образец 712) в двухфазных включениях плавление эвтектики растворов наблюдается при температуре от –55 до –49°C (L_1), что соответствует водно-солевым системам с $CaCl_2$ (Борисенко, 1982). Плавление льда происходит при температуре от –12 до –13.5°C. Общая концентрация солей колеблется от 16 до 17.5 мас. % $NaCl$ -экв. Гомогенизация включений наступает в интервале температур 277–170°C. В кварцевых вкрапленниках гранит-порфира (образец 716-2) присутствуют двух- и многофазные с галитом флюидные включения. Плавление эвтектики замороженных растворов в двухфазных включениях наблюдается при температуре –38...–37°C (L_2), полное плавление льда происходит в интервале температуры от –2.5 до –1.9°C. Гомогенизация двухфазных включений происходит в интервале температуры от 324 до 312°C. Растворы включений относятся к водно-солевой системе $NaCl-FeCl_3-K_2CO_3$, общая концентрация солей варьирует от 4 до 2 мас. % $NaCl$ -экв. Плавление эвтектики замороженных растворов трехфазных включений (B_2) наблюдается при температуре –42°C, газ гомогенизируется при 220–180°C, галит растворяется при 250–220°C, общая концентрация солей варьирует от 34.7 до 32.9 мас. % $NaCl$ -экв. По данным КР-спектроскопии, флюидные включения кварцевых вкрапленников гранит-порфира месторождения Давенда в газовой фазе содержат преимущественно CO_2 . При глубоком охлаждении включений не наблюдается конденсации CO_2 в жидкость, что указывает на незначительную плотность газовой фазы.

Таблица 3. Нормированные результаты анализа продуктов декрепитации флюидных включений (мас. %)

№*	O	Si	Na	Ca	Fe	Cl	S	Mn	K	As
(фиг. 11а)										
1	42.5	10.9	19.8	2.9	2.8	13.8	6.5	0.3	0.2	0.3
2	53.1	25.3	8.6	2.5	2.7	0.4	6.6	0.3	0.1	0.4
3	50.5	36.3	7.3	0.3	0.5	0	5.1	0	0	0
4	53.8	28.4	6.9	2	3	0.2	4.6	0.6	0.1	0.4
5	47.2	47.3	3.6	0	0	0	1.9	0	0	0
6	53.8	26.5	11.7	0.1	0	0	7.6	0	0.3	0
7	55.2	28.2	9.9	0.1	0	0	6.5	0	0.1	0
8	52.9	47.1	0	0	0	0	0	0	0	0
(фиг. 11б)										
1	39.4	20.1	19.4	1.2	0	16.9	2.9	0	0.1	
2	50.6	18.2	18.1	0.5	0	4.3	8.3	0	0	
3	36.2	18	22.3	0.9	0	19.1	3.3	0	0.2	
4	48.8	35.4	9.9	0	0	0.2	5.7	0	0	
5	49.3	45.9	3	0	0	0	1.8	0	0	
6	55.2	31.7	7.8	0	0	0	5.3	0	0	
7	53.5	46.5	0	0	0	0	0	0	0	
(фиг. 11в)										
1	13.1	5.43	35.09	0.76	0	44.05	1.43	0	0.13	0
2	28.18	14.76	27.41	0.51	0	27.7	1.42	0	0	0
3	36.04	22.82	21.1	0.15	0	17.94	1.95	0	0	0
4	52.91	42.02	2.73	0.34	0	0	2.01	0	0	0
5	47.94	12.05	23.46	0.15	0	8.57	7.83	0	0	0
6	15.58	18.84	21.14	1.36	0	40.86	2.22	0	0	0

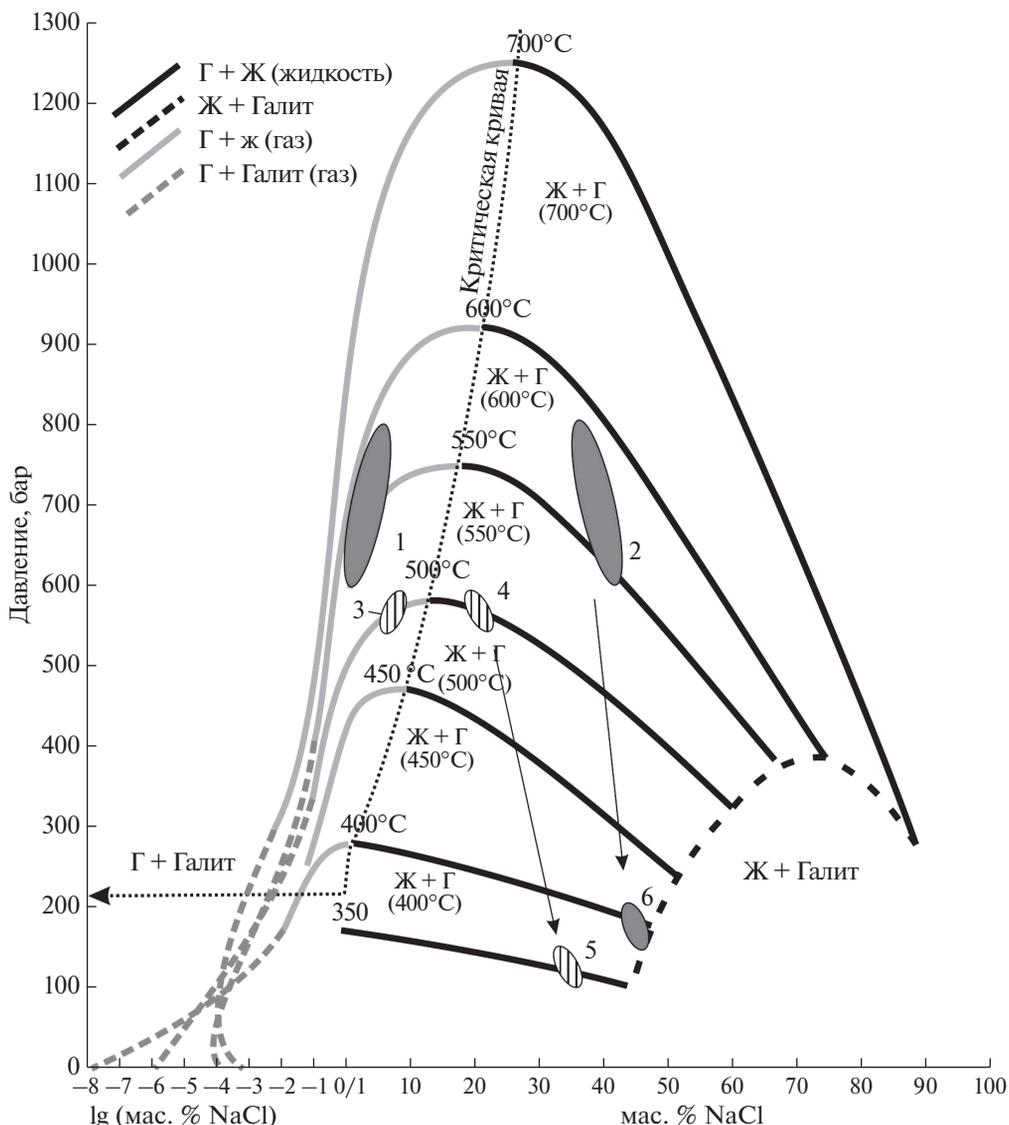
Примечание. * – номера анализов соответствует номерам точек на фотографиях фиг. 11 (а, б, в).

Состав продуктов декрепитации флюидных включений

Анализ состава солевых продуктов декрепитации флюидных включений, представляющих собой агрегат солей от высохших на поверхности полированных пластинок капель водно-солевых растворов флюидных включений (фиг. 11), в кварце месторождений Давенда и Александровское обнаружил отсутствие Li и Mg в их составе и подтвердил корректность вывода о Na–K–Ca–Fe-хлоридном составе растворов флюидных включений, сделанного на основе данных криометрии. В образцах кварц-молибденитовых жил месторождения Давенда солевые агрегаты декрепитации флюидных включений содержат Na, K, Ca, Fe, Mn, а также Cl, S и As (табл. 3). Повышенные содержания Ca вызваны присутствием ксеногенной твердой фазы кальцита в составе флюидных включений, тогда как для растворов включений в кварце рудных жил

месторождения Давенда не характерна CaCl₂-эвтектика.

Солевые агрегаты, полученные в результате декрепитации флюидных включений в образцах золотоносных пирит-кварцевых жил месторождения Александровское, в целом характеризуются таким же элементным составом, что и в образцах кварц-молибденитовых жил месторождения Давенда. Тем не менее, часть солевых агрегатов резко отличается от других относительным преобладанием Ca над примесями K и Fe, либо полным отсутствием K и Fe в своем составе, а также отсутствием As (фиг. 11б, табл. 3). Состав таких солевых агрегатов представлен, главным образом, хлоридами и сульфатами Na, Ca. Соли K присутствуют в подчиненных количествах, что соответствует составу флюидных включений типа L₁, по данным криометрии (фиг. 11в, табл. 3). Наличие в образцах пирит-кварцевых жил с золотом солевых продуктов декрепитации флюидных



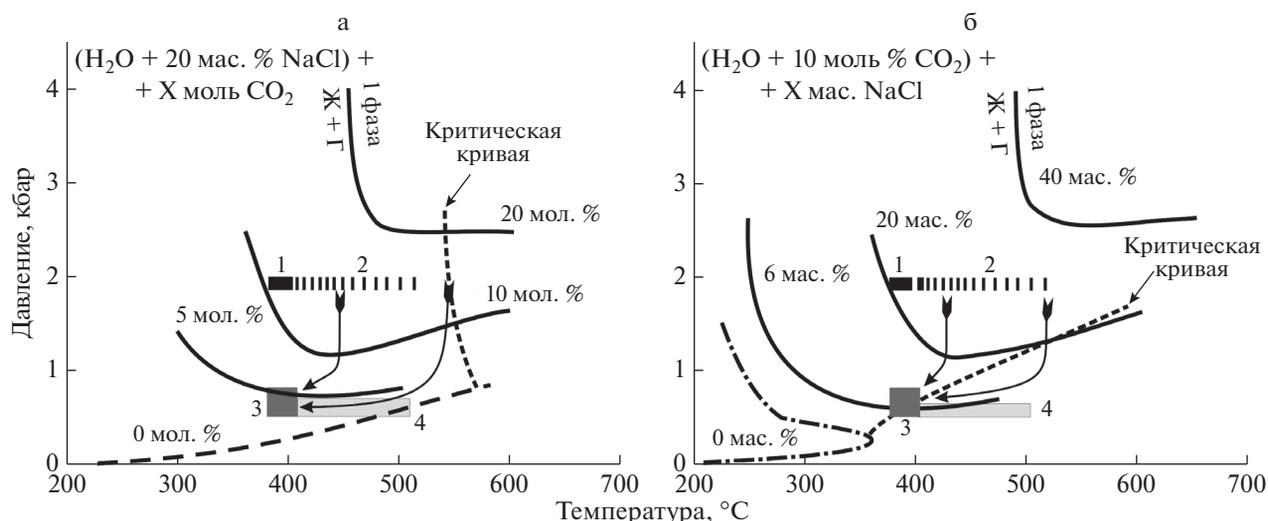
Фиг. 12. Сечения давление/ X_{NaCl} на фазовой диаграмме $H_2O-NaCl$, построенной по данным (Driesner, 2007; Driesner, Heinrich, 2007) из публикации Ж. Ричардса (Richards, 2011), с дополнениями авторов. Показаны предполагаемые условия захвата для низко- (V_2) и высококонцентрированных (V_1) включений (соответственно 1 и 2) при образовании молибденитовой минерализации месторождения Давенда. Стрелкой указан тренд изменения давления к условиям захвата трехфазных включений (V_2), в которых галит растворяется позже газа. Для месторождения Александровское указаны условия захвата сосуществующих двухфазных включений с концентрацией солей соответственно ~ 7 и ~ 20 мас. % (3 и 4), стрелкой показан тренд изменения P и T условиям захвата трехфазных включений с плотностью >1.0 .

включений, различающихся по элементному составу, подтверждает вывод об участии в образовании пирит-кварцевых жил с золотом двух типов гидротермальных флюидов, существенно различающихся по солевому составу. Важным дополнением к результатам интерпретации данных криометрии служит определение заметных количеств серы в составе продуктов декрепитации, что предполагает присутствие сульфатов в составе растворов флюидных включений. Не менее интересным является факт постоянного обнаружения As только в составе Na-K-Fe продуктов декрепитации, тогда

как фтор периодически присутствует только в Na-Ca солевых агрегатах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Давление и температура. В результате изучения флюидных включений месторождений Александровское и Давенда установлено, что в их составе преобладают NaCl, H_2O и CO_2 . Это позволяет применить экспериментальные данные по P T X V -состоянию систем $NaCl-H_2O$, CO_2-H_2O и $CO_2-NaCl-H_2O$ (и компьютерные программы,



Фиг. 13. Критические кривые и границы газ–жидкость при высоких давлении и температуре для систем: а – $(\text{H}_2\text{O} + 20 \text{ мас. \% NaCl-экв.}) + \text{CO}_2$ и б – $(\text{H}_2\text{O} + 10 \text{ мол. \% CO}_2) - \text{NaCl}$, из публикации (Schmidt, Bodnar, 2000); Ж + Г – поле сосуществующих жидкости и пара, 1 фаза – однофазное поле. *Добавления авторов:* для месторождения Александровское указаны: 1 – поле *PT*-параметров гомогенизированных плотных CO_2 включений; 2 – поле *PT*-условий их вероятного захвата кварцем жил при литостатическом давлении; 3 – поле *PT*-параметров гомогенизированных малоплотных CO_2 -включений; 4 – поле *PT*-условий существования двухфазных водно-солевых рудообразующих флюидов месторождений Александровское и Давенда. Стрелками показан вероятный тренд изменения давления от литостатического к гидростатическому, при котором происходило образование руд.

созданные на этой основе) для оценки давления и коррекции температуры рудообразования, допустив, что свойства природных флюидов и этих систем близки (Brown, 1989; Schmidt, Bodnar, 2000; Driesner, Heinrich, 2007; Bakker, 2001, 2018, Паинси и др., 2008). Разнообразные по фазовому наполнению флюидные включения, присутствующие в жильном кварце, могли быть захвачены в условиях гетерогенизации гомогенных высокотемпературных CO_2 -содержащих водно-солевых флюидов. После чего обогащенная CO_2 газообразная и водно-солевая жидкая фазы продолжали свою эволюцию, находясь в непосредственном контакте в состоянии, близком к равновесию, либо в автономном режиме как независимые системы. При этом происходил захват кварцем флюидных включений соответствующего фазового наполнения с доминированием тех или иных компонентов. Поэтому для расчета давления по CO_2 включений использовались данные по $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ и $\text{CO}_2\text{--NaCl--H}_2\text{O}$ системам. Для водно-солевых двухфазных и трехфазных включений, в которых вероятное содержание CO_2 оценить с помощью методов термометрии было затруднительно в связи с малыми размерами включений и незначительным количеством CO_2 , были использованы данные по системе $\text{NaCl--H}_2\text{O}$.

Месторождение Александровское. Моделирование *PTXV*-состояния системы $\text{NaCl--H}_2\text{O}$ (программа *AqSo_NaCl*) в двухфазной области показало, что трехфазные и двухфазные включения с

плотностью ~ 1 и концентрацией от 33.5 до 22 мас. % NaCl-экв. могут представлять жидкую фазу системы, которая захватывалась при сравнительно низкой температуре $\sim 345^\circ\text{C}$ и давлении ~ 118 бар (фиг. 12). Существенно газовые включения очень низкой плотности, в которых не видна каемка раствора и не конденсируется CO_2 при понижении температуры, вероятно, соответствуют равновесной газообразной фазе. Флюидные водно-солевые включения более низкой плотности ~ 0.79 и ~ 0.51 с концентрацией солей $\sim 19.4\text{--}11.9$ и $\sim 7.2\text{--}6.5$ мас. % соответственно (обр. 280, табл. 2) могут представлять несмесимые фазы системы $\text{NaCl--H}_2\text{O}$ в VL-области и быть захваченными при более высокой температуре $\sim 500^\circ\text{C}$ и давлении ~ 570 бар (фиг. 12).

Месторождение Давенда. Для трехфазных включений (B_2), в которых растворение галита происходит при более высоких температурах, чем гомогенизация газа, расчетное давление при полной гомогенизации (380°C) составляет чрезмерную величину 3.2–2.7 кбар. Фигуративные точки таких включений на диаграмме состояния водно-солевой системы $\text{NaCl--H}_2\text{O}$ попадают на кривую насыщения (SL) (фиг. 12). В такие включения мог быть захвачен перенасыщенный флюид с зародышами кристаллов NaCl (Bodnar and Vityk, 1994; Driesner, Heinrich, 2007). Результаты численного моделирования (программа *AqSo-NaCl*) в области двухфазного состояния системы $\text{NaCl--H}_2\text{O}$ для пар сосуществующих включений (B_1 и L_2) с концен-

Таблица 4. Данные микротермометрического изучения флюидных включений с углекислотой и результаты определения с помощью программных пакетов Vx-Tern.exe (Паинси и др., 2008), ISOHOR (Bakker, 2001) и FLINCOR (Brown, 1983) плотности и состава, а также давления при температуре полной гомогенизации

Образец	T_h (°C)	T_h CO ₂ (°C)	T_{Cl_a} (°C)	Плотность включения (г/см ³) и состав	Давление (Кбар) при T_h (°C)
280	410–380	+24.5...+30.9 (ж)	+9	0.44–0.31 XН ₂ О = 0.35–0.25 XСО ₂ = 0.64–0.74 XNaCl = 0.009–0.006 (2.5)**	0.47–0.50 и 0.66–0.72***
280	380*	+16.7...+17 (ж)	+9.1	0.8–0.81 XН ₂ О = 0.06 XСО ₂ = 0.94 XNaCl = 0.001 (1.6)	1.9–2.0
224	360–340	+30...+31 (ж)	+9.2	0.41–0.42 XН ₂ О = 0.43–0.31 XСО ₂ = 0.56–0.69 XNaCl = 0.006–0.004 (1.4)	0.76–0.71 и 0.82–0.87
224	380*	+25...+30 (ж)	+9.2	0.74–0.72 XН ₂ О = 0.27–0.31 XСО ₂ = 0.72–0.69 XNaCl = 0.003–0.004 (1.5)	1.5–1.2 и 1.6–1.3

Примечание. * – температура декрепитации; ** – в скобках указана концентрация растворов в мас. % NaCl-эquiv. *** – приведены интервалы давления для крайних значений плотности и температуры гомогенизации. Сокращения: T_h – температура полной гомогенизации включения, T_h CO₂ – температура гомогенизации CO₂; ж – в жидкость или г – в газ; T_{Cl_a} – температура плавления клатрата CO₂.

трацией солей 40 и 3.5–2.1 мас. % NaCl-эquiv., гомогенизирующихся соответственно при 399–390°C в жидкость (после растворения галита) и при 438–403°C в газ (обр. 714, табл. 2), дают основание оценить интервал температуры их захвата от 600 до 550°C и давление от 800 до 630 бар (фиг. 13). Необходимо заметить, что расчетная плотность модельных фаз, представляющих жидкую и газообразную части системы NaCl–H₂O, занижена по сравнению с плотностью флюидных включений, определенной по температуре их гомогенизации. Вероятно, это вызвано влиянием присутствующей, но не определенной CO₂ в их составе, что дает основание полагать некоторое занижение расчетного давления по сравнению с истинными значениями давления рудообразования. Нельзя исключать и неточное определение момента исчезновения газового пузырька в жидкости и связанное с этим занижение температуры гомогенизации включений.

Согласно результатам расчетов, проведенных с помощью компьютерных программ, моделирующих PTV-состояние систем CO₂–H₂O и CO₂–NaCl–H₂O, плотные CO₂-включения (0.81–0.8 г/см³) в кварце образца № 280 могли захватываться при давлении 2–1.9 кбар и температуре выше 380°C (табл. 4). Малоплотные CO₂-

включения (0.42–0.24 г/см³) в том же кварце могли быть захвачены при давлении 0.72–0.5 кбар в интервале температуры от 410 до 380°C (табл. 4). Кварц диоритового порфирита мог захватывать плотные CO₂-включения при давлении от 1.6 до 1.2 кбар, низкоплотные при 0.87–0.71 кбар. Фигуративные точки PT-параметров изученных плотных CO₂-включений соответствуют двухфазному состоянию флюида с концентрацией 20 мас. % NaCl и содержанием CO₂ около 15 моль % (Schmidt, Vodnar, 2000), где сосуществуют существенно углекислотная фаза и водно-солевая с небольшим количеством CO₂ (фиг. 13а, б). Отделение газообразной CO₂-фазы с низкой плотностью происходило в условиях, близких к условиям гетерогенизации критических гомогенных флюидов с концентрацией около 20–15 мас. % (фиг. 12 и 13).

Попытка определения глубины рудообразования. В публикации (Baker, 2002) приведен обзор характеристик флюидных включений в минералах золоторудных месторождений, связанных с интрузиями, из которого следует, что с глубиной происходит систематическое изменение фазового состояния CO₂-содержащих гидротермальных флюидов. Так, формирование ранних Мо–W-минеральных ассоциаций на месторождениях Шотган (Аляска) и Кидстоун (Квисленд, Ав-

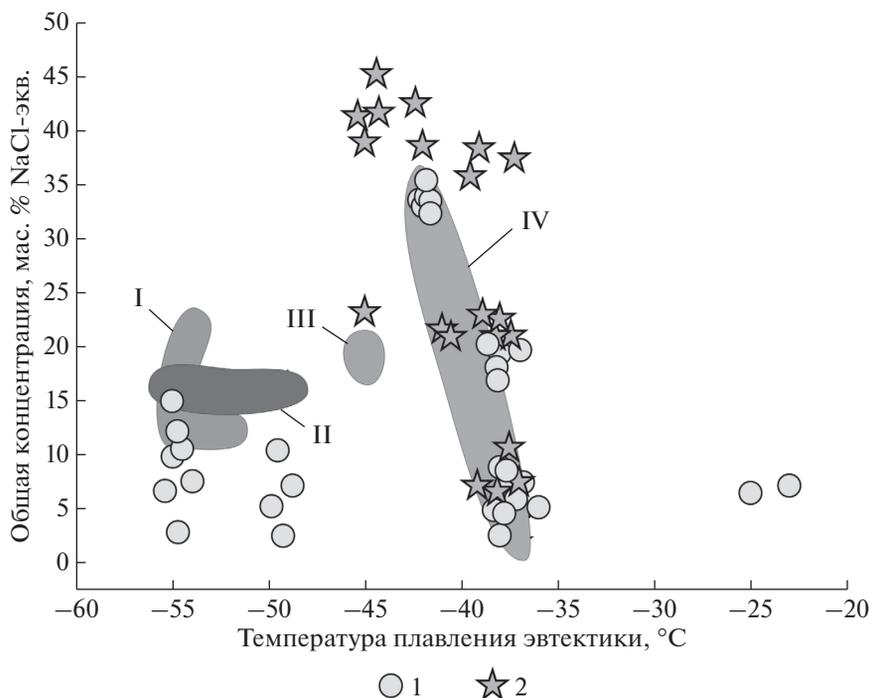
стралия), связанных с порфировым штокверком и брекчиями, происходило при 340–600°C и участии газообразных CO₂ и высококонцентрированных (20–50 мас. %) водно-солевых гидротермальных флюидов. Основной стадии отложения Au предшествовали кварцевые жилы, формировавшиеся из флюидов с низкой соленостью и содержащих заметную долю CO₂. Золото отлагалось гидротермальными флюидами с низкой соленостью (2–10 мас. % NaCl) и с более низкой температурой (170–350°C). Предполагается, что такие флюиды могли образоваться в результате конденсации газообразных фракций ранней стадии разделения CO₂-содержащих флюидов. Глубина образования оценивается в 3.5 км ниже палеоповерхности (Vakerg, 2002). Образование жильных месторождений золота Форт Нокс (Аляска), Дублин Галч (Юкон), связанных с интрузиями, также происходило в условиях гетерогенизации CO₂-содержащих гидротермальных флюидов на существенно газовую CO₂-фазу и водно-солевую фракцию (Vakerg, 2002). Минерализованные кварцевые жилы месторождения Форт-Нокс содержат включения CO₂ и малосоленые включения (2–8 мас. % NaCl-экв.), захваченные при ~1.5 кбар и 270–330°C. Менее перспективные жильные Au-месторождения на Юконе характеризуются сходными чертами, в частности Дублин Галч. Ранний кварц золотосодержащих жил обычно содержит обильные CO₂-обогащенные ($X_{CO_2} = 0.18–0.75$) водные включения, а также умеренно солевые (<15 мас. % NaCl-экв.) и редкие, высокосолёные (галит-содержащие) водные включения. Флюидные включения гомогенизируются в диапазоне от 141 до 355°C и характеризуются давлением захвата, превышающим 1.1 кбар (Vakerg, 2002). Близкие характеристики имеют флюидные включения в кварце других жильных золоторудных месторождений, связанных с интрузиями: Мокрско (Чехия), Васильковское, (Казахстан), Джилау, Дарасун (Россия) (Спиридонов и др., 2006; Прокофьев, Зорина, 1996).

Согласно данным (Vakerg, 2002), обнаруженная в кварце Александровского месторождения ассоциация плотных CO₂-включений с высококонцентрированными включениями, характерна для порфировых брекчиево-штокверковых месторождений. В то же время, ассоциация низкоконцентрированных включений с CO₂, а также незначительное распространение включений с галитом, более характерно для жильных Au-месторождений, сформированных при большем давлении и на больших глубинах (Vakerg, 2002). Такая противоречивость данных изучения включений находит свое объяснение в оригинальной интерпретации данных изучения газовых CO₂-обогащенных и водно-солевых флюидных включений в кварце руд Дарасунского месторождения в Восточном Забайкалье (Прокофьев, Зорина, 1996; Прокофьев и др., 2000),

которые установили два разных интервала величин давления 360–65 и 1540–695 бар, развиваемого содержимым включений при температурах их гомогенизации. Первый интервал, по их мнению, соответствует вероятному гидростатическому давлению, второй – литостатическому давлению рудообразования. На этом основании сделан вывод о том, что литостатическое давление соответствует этапу развитию процесса рудообразования в условиях “закрытой” системы. Когда же происходит интенсивное раскрытие зияющих трещин (система становится “открытой”), давление снижается до уровня гидростатического (Прокофьев, Зорина, 1996).

Используя этот безусловно обоснованный подход, можно предположить, что интервал давления от 2 до 1.9 кбар, определенный по плотным CO₂-включениям, соответствует этапу развития месторождения Александровское в условиях “закрытой системы” при литостатическом давлении на глубине порядка 7.4–7 км. Затем процесс рудообразования продолжал развиваться уже в условиях “открытой системы” на той же глубине. Давление становится близким к гидростатическому 0.72–0.5 кбар (по низкоплотным CO₂-включениям) и соответствует глубине (7.2–5 км), хорошо совпадающей с оценкой по литостатическому давлению. Близкая глубина рудообразования была получена и по водно-солевым включениям ~5.7 км. Давление понижалось от литостатического до гидростатического, скорее всего, за счет образования системы сопряженных субвертикальных трещин в кварцевых жилах, а не за счет интенсивного образования штокверка и брекчирования при эксплозивных процессах, столь свойственных типичным Cu–Mo-порфировым месторождениям.

Изменение величины давления от литостатического к гидростатическому явилось причиной кипения и отложения руд при переходе рудообразующих флюидов в перенасыщенное состояние по многим растворенным компонентам, в том числе рудным, что фиксируется постоянным присутствием в составе флюидных включений субмикронных ксеногенных минеральных фаз – халькопирита, молибденита, гематита и особенно кальцита, осаждение которого могло сопровождать кипение CO₂ флюида без его быстрого охлаждения (Dong, Morrison, 1995). Некоторое несоответствие величин глубин рудообразования, определенных по литостатическому и гидростатическому давлению, объясняется тем, что в “закрытой” системе величина давления лимитируется только прочностью пород (Прокофьев, Зорина, 1996), а в “открытой” системе следует предполагать наличие в системе взаимосвязанных субвертикальных трещин протяженной области низкоплотного пара над поверхностью кипящего флюида, что приводит к еще большему



Фиг. 14. Концентрация растворов флюидных включений и температура плавления эвтектики. Александровское месторождение – пирит-кварцевая минеральная ассоциация с золотом (1), Давендинское месторождение – светло-серый кварц с молибденитом (2). Флюидные включения в кварце и апатите магматических пород амуджикано-сретенского комплекса в пределах Александровского и Давендинского месторождений: кварцевый диорит-порфирит (I) и диоритовый порфирит (II), гранит-порфир (III и IV).

понижению гидростатического давления (Жатнуев и др., 1996).

Образование молибденовых руд месторождения Давенда происходило в условиях гидростатического давления и отвечает глубине 8–6.3 км, что фактически соответствует оценке глубины образования руд Александровского месторождения, руды которого формировались близко- или одновременно с рудами месторождения Давенда. На месторождении Давенда процесс рудообразования на ранней стадии также сопровождался кипением рудообразующих флюидов. Реальность протекания процессов кипения подтверждается *PT*-параметрами части существенно газовых и трехфазных включений, фигуративные точки которых на диаграмме состояния водно-солевой системы NaCl–H₂O находятся соответственно на кривых VL и SL (фиг. 10).

Температура гомогенизации и поправка на давление. Методом построения изохор (программа AqSo–NaCl) по известной плотности и составу растворов двухфазных включений в кварце рудных жил месторождения Александровское была определена поправка для температур гомогенизации на гидростатическое давление (870–710 бар), при котором происходило рудообразование. Полученные значения температуры разделились на три интервала, которые коррелируют со стадия-

ми рудообразования: 485–400°C – ранняя стадия (молибденит-кварцевая и кварц-турмалиновая ассоциация), 355–250°C – основная (золото-кварц-полиметаллическая, пирит-кварцевая с золотом и висмутин-кварцевая ассоциации) и 230–200°C – поздняя стадия (кварц-карбонатная ассоциация). На месторождении Давенда молибденит-кварцевая ассоциация с учетом поправки на давление кристаллизовалась в интервале температуры от 552 до 405°C. Кроме того, выявляется интервал 380–244°C, который совпадает с температурным интервалом образования рудных ассоциаций основной стадии на месторождении Александровское. Двух- и трехфазные включения в минералах магматических пород характеризуется большей плотностью по сравнению с гетерофазными или сверхкритическими флюидами, которые могли бы быть захвачены при высоких температурах в условиях, близких к гранитному или диоритовому солидусу. Захват флюидных включений в минералах магматических пород, вероятнее всего, происходил в самом конце или уже после кристаллизации дайковых пород на глубине, близкой к уровню рудообразования. С учетом поправки на литостатическое давление параметры рудообразования: 2–1.9 кбар при температуре от 550 до 400°C.

Состав рудообразующих флюидов. Исследования флюидных включений выявили близость со-

става гидротермальных флюидов, которые формировали молибденит-кварцевую минеральную ассоциацию на месторождениях Давенда и Александровское (фиг. 10, 14). На месторождении Давенда эта ассоциация была сформирована при участии хлоридных Na–K–Fe-высококонцентрированных флюидов (43.2–39.6 мас. %). По сравнению с Давендой, молибденит-кварцевая минеральная ассоциация на месторождении Александровское формировалась при участии менее концентрированных близких по составу хлоридных Na–K–Fe-флюидов (от 33.9 до 33.0 мас. % NaCl-экв.). Солевой состав рудообразующих флюидов молибденит-кварцевой минеральной ассоциации на месторождениях коррелирует с составом магматогенных флюидов гранит-порфиров амуджикано-сретенского комплекса, с которыми генетически связаны многие рудные месторождения региона. Генетическое родство рудообразующих и магматических флюидов подтверждают близкие концентрации и солевой состав этих флюидов, представленный NaCl, KCl с примесью хлоридов Fe, Mn, а также отмечается присутствие As в их составе (табл. 3).

Образование пирит-кварцевой с золотом минеральной ассоциаций основной стадии на месторождении Александровское происходило при участии Ca–Na-хлоридных растворов, которые по температуре плавления эвтектики, а значит и по солевому составу, близки к флюидам захваченных включениями в минералы средних по составу пород амуджикано-сретенского комплекса (фиг. 14). Na–Ca-хлоридные флюиды характеризуются умеренной до низкой концентрацией солей от 22.6 до 2.6 мас. % NaCl-экв. и присутствием в составе плотной CO₂, N₂ и H₂S, а также F. Состав этих флюидов коррелирует с Na–Ca-составом магматических флюидов, захваченных кварцевыми вкрапленниками и апатитом средних пород амуджикано-сретенского комплекса. Газовая фаза этих магматических флюидов также представлена плотной CO₂, N₂ и H₂S.

Na–K–Fe- и Ca–Na-хлоридные рудообразующие флюиды играли разную роль в образовании Au- и Mo-порфировой минерализации Александровского месторождения. Образцы пирит-кварцевых жил, где были обнаружены только флюидные включения состава CaCl₂–NaCl либо NaCl–KCl, характеризуются убогим содержанием Au. Напротив, образцы пирит-кварцевых жил, где обнаруживаются как Na–K–Fe-хлоридные, так и Ca–Na-хлоридные флюидные включения, содержат повышенные концентрации Au. При этом необходимо заметить, что в таких образцах обнаружены признаки присутствия примеси CaCl₂ в составе Na–K–Fe-хлоридных флюидных включений, что можно расценивать как результат смешения минералообразующих флюидов с разным соле-

вым составом. Примечателен факт присутствия CaCl₂ в составе растворов, содержащихся в плотных CO₂-включениях и отсутствия плотной CO₂ в составе включений с Na–K–Fe-хлоридными растворами, что указывает на магматические расплавы диоритового состава как источник CO₂-флюидов. Сопоставление солевого и газового состава рудообразующих и магматогенных флюидов дает основания заключить, что генерация рудообразующих флюидов молибденит-кварцевой минерализации месторождений Давенда и Александровское имеет прямое отношение к формированию кислых пород известково-щелочного состава, а Na–Ca-хлоридные флюиды с CO₂, участвовавшие в образовании золотоносных пирит-кварцевых жил Александровского месторождения, генерировались в процессе образования расплавов и кристаллизации пород калиевого субщелочного составов.

Магматические расплавы, кристаллизовавшиеся на уровне образования рудных тел в виде даек, сами по себе не могли быть достаточным источником рудообразующих флюидов. Необходимый дебет рудообразующих флюидов могла обеспечить только свободная флюидная магматическая фракция, которая транспортировалась к поверхности автономно, либо в виде самостоятельной фазы в магматическом расплаве и находилась в равновесии с ним, на что прямо указывает присутствие первичных двухфазных включений в акцессорном апатите диоритового порфирита. Генерация таких магматогенных флюидов могла происходить совместно с образованием магматических расплавов в промежуточных магматических очагах в результате смешения магматических расплавов мантийного и корового происхождения. По данным (Webster, 2004), изменение состава магматического расплава от основного к кислому должно приводить к радикальному обогащению хлором обособляющихся магматических флюидов. То же самое касается и CO₂ и S, учитывая высокую растворимость и в 10 раз большее содержание этих компонентов в базитовых расплавах, чем в расплавах гранитоидного состава (Наумов и др., 2017, 2019).

Роль CO₂ и вероятная эволюция рудообразующих флюидов. Роль CO₂ в образовании Au-минерализации показана на примере орогенных месторождений золота, образующихся на глубине 7–12 км (Klein, Fuzikawa, 2010; Xu et al., 2015). Предполагается, что CO₂, которая повсеместно содержится в рудообразующих флюидах этих месторождений, непосредственно не способствует транспортировке золота, поскольку Au не имеет прочной химической связи с карбонат-ионом. Тем не менее, CO₂ может опосредованно влиять на процесс рудообразования. Во-первых, присутствие CO₂ в качестве слабой кислоты буферизует pH флюида в пределах интервала, где высокая концентрация

золота во флюиде способна поддерживаться за счет восстановления комплексов серы (Phillips, Evans, 2004, Bower, 1991). Во-вторых, присутствие CO_2 расширяет область физико-химических условий, в которых могут существовать критические и несмешивающиеся флюиды, и, таким образом, влиять на образование и существование паров, содержащих рудные элементы (Lowenstern, 2001). Экспериментальные исследования показывают, что пары, обогащенные CO_2 , способны переносить большие количества Cu и Au (Lai, Chi, 2007). В-третьих, фазовое разделение флюида способно изменять такие физико-химические свойства флюида, как парциальное давление CO_2 и pH , вызывая дестабилизацию растворимых форм рудных элементов, в частности Au , и их осаждение в виде рудных минералов. В образовании золотой минерализации месторождения Александровское CO_2 играла ту же роль, что и при образовании орогенных золоторудных месторождений, в ходе протекания схожих, но не тождественных процессов, учитывая, что глубина рудообразования на месторождении Александровское оценивается в ~ 7 км и режим давления рудообразования менялся от литостатического к гидростатическому.

При литостатическом давлении (2–1.9 кбар) флюидная система месторождений Давенда и Александровское (на изученном уровне) уже находилась в гетерофазном состоянии и была представлена плотной газообразной CO_2 -фазой и водно-солевой. Соленость последней можно оценить в ~ 20 –15 мас. % NaCl -экв., что близко к критической концентрации двухфазных флюидов, формировавших молибденитовую минерализацию при 550 – 450°C (фиг. 12, 13), и близко соответствует солености магматического флюида, захваченного апатитом диоритового порфирита (обр. 712, фиг. 14, табл. 2) в виде первичных включений. В таких условиях на глубине 7.9 – 7 км (Александровское) и 8 – 6.3 км (Давенда) происходило формирование кварцевых жил, которые обеспечили “жильный” облик и стиль месторождений (Baker, 2002). Затем литостатический режим изменился на гидростатический, давление на уровне рудоотложения понизилось до 0.72 – 0.47 кбар, но глубина рудообразования радикально не изменилась. Развитие сопряженных субвертикальных проницаемых трещин в жильном кварце обеспечило понижение давления в гидротермальной системе и способствовало образованию над поверхностью гидротермального раствора протяженной по вертикали области пара, что могло приводить к еще большему падению давления. На этом этапе происходил процесс кипения и гетерогенизации гомогенной жидкой флюидной магматической фазы с разделением ее на газообразную и высококонцентрированную водно-солевою. В результате жильный кварц захватывал ассоциации высоко- и низкоконтен-

трированных флюидных включений, характерных для порфировых месторождений. Отсутствие зон развития минерализованных штокверков и эксплозивных брекчий указывает, что рудообразование на этом этапе протекало, главным образом, в среде жильного выполнения, где локализована рудная минерализация. Это является существенным отличием месторождений Давенда и Александровское от типично порфировых месторождений, формирующихся на меньших глубинах, рудные тела которых представлены минерализованными штокверками и эксплозивными брекчиями.

ВЫВОДЫ

1) Образование золотоносных пирит-кварцевых жил Александровского месторождения происходило при единовременном участии разных по солевому составу гидротермальных флюидов. NaCl – KCl – $\text{FeCl}_{2/3}(\text{As})$ -флюиды участвовали в формировании молибденит-кварцевой минерализации, в образовании золотоносных минеральных ассоциаций принимали участие как NaCl – KCl – $\text{FeCl}_{2/3}(\text{As})$ -, так и NaCl – CaCl – CO_2 – N_2 – $\text{H}_2\text{S}(\text{F})$ -флюиды.

2) Процессы гетерогенизации и кипения рудообразующих флюидов, а также смешение флюидов стимулировало образование богатого золотого оруденения – наибольшее содержание Au отмечается на тех интервалах рудных жил, где в кварце фиксируется присутствие флюидных включений разного состава.

3) Источниками NaCl – CaCl – CO_2 – N_2 – H_2S и NaCl – KCl – $\text{FeCl}_{2/3}(\text{CO}_2)$ -флюидов являлись магматические расплавы, формировавшие соответственно высококалийные и известково-щелочные породы амуджикано-сретенского комплекса.

4) Глубина образования продуктивных рудных минеральных ассоциаций в жилах месторождений Александровское и Давенда оценивается в 7.9 – 7 и 8 – 6.3 км соответственно, что не свойственно типично порфировым месторождениям, для формирования которых характерна меньшая глубина.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят профессора НГУ д.г.-м.н. А.С. Борисенко и ведущего сотрудника ГЕОХИ РАН д.г.-м.н. В.Б. Наумова за полезные советы, высказанные ими при прочтении рукописи. Кроме того, авторы выражают свою искреннюю признательность и уважение ведущему научному сотруднику ИГЕМ РАН, д.г.-м.н. Сергею Гарольдовичу Соловьеву, чье пристрастное, но в то же время доброжелательное и заинтересованное отношение к рукописи, а также высказанные им чрезвычайно ценные замечания и

рекомендации позволили авторам статьи существенно ее улучшить.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГМ СО РАН № 0330-2016-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Посохов В.Ф. Широкинский рудный узел (Восточное Забайкалье): условия образования, геохимические особенности пород и руд, связь оруденения с магматизмом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 6–17.

Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Боровиков А.А., Бадмацуренова Р.А., Посохов В.Ф. Александровское золоторудное месторождение: петрогеохимия пород и руд, источники и время образования оруденения // Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии: Матер. V Всеросс. науч.-практ. конф. посвящ. 45-летию Геологического института СО РАН. Отв. ред. Е.В. Кислов. 2018. С. 4–6.

Андреева О.В., Головин В.А., Козлова П.С. Эволюция мезозойского магматизма и рудно-магматических процессов в Юго-Восточном Забайкалье // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38. № 2. С. 115–130.

Антипин В.С. Петрология и геохимия мезозойских гранитоидов Пришилкинской зоны (Восточное Забайкалье): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИГХ СО РАН СССР, 1970. 20 с.

Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О., Крымский Р.Ш., Ларионов А.Н., Николаева И.В., Серов П.А. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетические особенности // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 6. С. 764–786.

Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О., Баянова Т.Б., Киселева В.Ю., Крымский Р.Ш., Лепехина Е.Н., Палесский С.В. Жирекенская Мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): U–Pb возраст, источники, геодинамическая обстановка // Геология и геофизика. 2015. Т. 53. № 3. С. 571–594.

Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М.: Недра, 1982. С. 37–47.

Борисенко А.С., Холмогоров А.И., Боровиков А.А., Шебанин А.П., Бабич В.В. Состав и металлоносность рудообразующих растворов Депутатского оловорудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 11. С. 1830–1841.

Борисов В.А. О закономерностях пространственного размещения золотого и молибденового оруденения в Амуджикано-Давендинском рудном районе // Геология некоторых рудных месторождений Забайкалья.

Под ред. Ф.И. Вольфсон. Чита: Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт министерства геологии СССР, 1968. С. 163–175.

Боровиков А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Определение хлоридов железа (II, III) и цинка в растворах флюидных включений при криометрических исследованиях // Геохимия. 2002. № 1. С. 70–79.

Жатнуев Н.С., Миронов А.Г., Рычагов С.Н., Гунин В.И. Гидротермальные системы с паровыми резервуарами (Концептуальные, экспериментальные и численные модели). Под ред. В.Л. Таусона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 183 с.

Зорина Л.Д., Куликова З.И. Рудогенерирующий магматизм и золотое оруденение Дарасунского рудного узла в Восточном Забайкалье // Проблемы петрогенезиса и рудообразования: Тез. докл. чтений им. А. Н. Заварицкого. Екатеринбург, 1998. С. 68–70.

Коваль П.В. Региональный геохимический анализ гранитоидов. Новосибирск: Ин-т геохимии им. А.П. Виногоградова СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. 492 с.

Козлов В.Д. Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометалльных провинций. Под ред. Л.В. Таусона. М.: Наука, 1985. 304 с.

Криволуцкая Н.А., Гонгальский Б.И. Ключевское месторождение // Месторождения Забайкалья. Под ред. Акад. Н.П. Лавёрова (в 2 кн.). М.: Геоинформмарк, 1995. Т. I. Кн. II. С. 33–40.

Кузьмин М.И., Антипин В.С. Геохимическая характеристика мезозойских гранитоидов Восточного Забайкалья // Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. С. 132–185.

Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок земли. I. Расплавы основного состава // Геохимия. 2017. № 7. С. 618–643.

Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок земли. II. Расплавы кислого состава // Геохимия. 2019. Т. 64. № 4. С. 395–408.

Паинси М., Даймонд Л.В., Акинфиев Н.Н. Метод оценки мольных объемов и составов CO₂–H₂O–NaCl флюидных включений на основе микротермометрических и оптических измерений // Матер. XIII Междунар. конф. по термобарогеохимии и IV симпозиума APFIS. М.: ИГЕМ РАН, 2008. Т. 1. С. 43–46.

Петрографический Кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание второе. / Под ред. Л.Н. Шарпенко, О.А. Богатикова, О.В. Петрова. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 197 с.

Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Флюидный режим Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное За-

- байкалье) по данным исследования флюидных включений // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 5. С. 50–61.
- Прокофьев В. Ю., Бортников Н. С., Зорина Л. Д., Куликова З. И., Мател Н. Л., Колпакова Н. Н., Ильина Г. Ф. Генетические особенности золото-сульфидного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 6. С. 526–548.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 558 с.
- Смирнов С. С. Очерк металлогении Восточного Забайкалья: Восточно-Сибирское геологическое управление, Иркутский государственный университет. Москва–Ленинград: Госгеолтехиздат, 1944. 91 с.
- Соловьев С. Г. Металлогения шшонитового магматизма (в 2-х томах). М.: Научный мир, 2014. 1000 с.
- Сотников В. И. Медно-молибден-порфировая рудная формация: природа, проблема объема и границ // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 3. С. 355–363.
- Сотников В. И., Берзина А. П., Никитина Е. И., Проскуряков А. А., Скуридин В. А. Медно-молибденовая рудная формация (на примере Сибири и сопредельных регионов). Труды ИГиГ СО АН СССР: Вып. 319. Новосибирск: Наука, 1977. 423 с.
- Сотников В. И., Пономарчук В. А., Берзина А. П., Гимон В. О. Магматические и металлогенетические предшественники рудоносного порфирового магматизма в медно-молибденовых рудных узлах // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 12. С. 1277–1285.
- Спиридонов А. М., Зорина Л. Д., Китаев Н. А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья (под ред. проф. Коробейников А. Ф.) Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2006. 291 с.
- Спиридонов А. М., Козлов В. Д., Зорина Л. Д., Меньшиков В. И., Бычинский В. А. Распределение золота в гранитоидных магматических комплексах Центрального и Юго-Западного районов Восточного Забайкалья // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 8. С. 1088–1100.
- Таусон Л. В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 280 с.
- Таусон Л. В. Магмы и руды. Геохимия рудообразующих систем и металлогенетический анализ. Новосибирск: Наука, 1989. С. 5–7.
- Таусон Л. В., Антипин В. С., Захаров М. Н., Зубков В. С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. С. 215.
- Таусон Л. В., Гундобин Г. М., Зорина Л. Д. Геохимические поля рудно-магматических систем. Под ред. Козлова В. Д. Новосибирск: Наука, 1987. 202 с.
- Федорчук В. Я., Лукин В. Л. Месторождение Уконик // Месторождения Забайкалья. Под ред. Акад. Н. П. Лавёрова (в 2 книгах). М.: Геоинформмарк, 1995. Т. I. Кн. II. С. 49–55.
- Хомич В. Г., Борискина Н. Г. Совершенствование минералогического районирования Восточного Забайкалья на основе геофизических исследований // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 7. С. 1029–1046.
- Чернышев И. В., Прокофьев В. Ю., Бортников Н. С., Чугаев А. В., Гольцман Ю. В., Лебедев В. А., Ларионова Ю. О., Зорина Л. Д. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 3–18.
- Юргенсон Г. А. Минеральное сырье Забайкалья. Ч. I. Кн. 3. Благородные металлы. Чита: Поиск, 2008. 256 с.
- Юргенсон Г. А., Юргенсон Т. Н. Дарасунское рудное поле. Месторождения Забайкалья. Под. Ред. акад. Н. П. Лавёрова (в 2-х книгах). М.: Геоинформмарк, 1995. I, II. С. 3–18.
- Юргенсон Г. А., Смирнова О. К., Солодухина М. А., Филенко Р. А. Геохимические особенности руд и технозёмов хвостохранилища золото-молибденового рудника Давенда в Восточном Забайкалье // Литосфера. 2016. № 2. С. 91–106.
- Bakker R. J. Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochores // Memoir Geol. Soc. 2001. № 7. P. 23–25.
- Bakker R. J. AqSo–NaCl: Computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O–NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation // Computers and Geosciences. 2018. V. 115. P. 122–133.
- Baker T. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits // Econ. Geol. 2002. V. 97. P. 1111–1117.
- Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for NaCl–H₂O fluid inclusions. In: *De Vivo B, Frezzotti ML* (eds) // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Virginia Polytechnic Inst State Univ, Blacksburg, VA, 1994. P. 117–131.
- Bower T. S. The deposition of gold and other metals: pressures-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 247–2434.
- Brown P. E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // Amer. Miner. 1989. V. 74. № 11–12. P. 1390–1393.
- Davis D. W., Lowenstein T. K., Spencer R. J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, NaCl–CaCl₂–H₂O // Geochim. Cosmochim. Acta. 1990. V. 54. P. 591–601.
- Dong G., Morrison G., Jaireth S. Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication // Econ. Geol. 1995. V. 90. № 6. P. 1841–1856.
- Driesner T. The system H₂O–NaCl. Part II: Correlations for molar volume, enthalpy, and isobaric heat capacity from 0 to 1000°C, 1 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 4902–4919.
- Driesner T., Heinrich C. A. The system H₂O–NaCl. Part I: correlation formulae for phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000°C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 4880–4901.

- Klein E. L., Fuzikawa K.* Origin of the CO₂-only fluid inclusions in the Palaeoproterozoic Carará vein-quartz gold deposit, Ipitanga Auriferous District, SE-Guiana Shield, Brazil: Implications for orogenic gold mineralisation // *Ore Geol. Rev.* 2010. V. 37. P. 31–40.
- Lai J., Chi G.* CO₂-rich fluid inclusions with chalcopyrite daughter mineral from the Fenghuangshan Cu–Fe–Au deposit, China: implications for metal transport in vapour // *Miner. Deposita.* 2007. V. 42. P. 293–299.
- Lowenstern J.B.* Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems // *Mineralium Deposita.* 2001. V. 36. P. 490–502.
- Phillips G.N., Evans K.A.* Role of CO₂ in the formation of gold deposits // *Nature.* 2004. V. 429. P. 860–863.
- Richards J.P.* Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins // *Ore Geol. Rev.* 2011. V. 40. P. 1–26.
- Samson I.M., Walker R.T.* Cryogenic raman spectroscopic studies in the system NaCl–CaCl₂–H₂O and implications for low-temperature phase behavior in aqueous fluid inclusions // *Can. Mineral.* 2000. V. 38. P. 35–43.
- Schmidt C, Bodnar R.J.* Synthetic fluid inclusions: XVI. PVTX-properties in the system H₂O–NaCl–CO₂ at elevated temperatures, pressures, and salinities // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. V. 64. Is. 22. P. 3853–3869.
- Webster J.D.* The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids // *Chem. Geol.* 2004. V. 210. P. 33–48.
- Williams-Jones A.E., Heinrich C.A.* Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Econ. Geol.* 2005. V. 100. P. 1287–1312.
- Xu J., Yang R., Xiao X., Lina L., Mulder D.C.* CO₂-rich inclusions in vein gold-copper mineralization of the Sarekoubu-Qi Xia District, southern Altai, China: Implication for ore genesis // *J. Geochem. Explor.* 2015. V. 159. P. 262–277.