

## ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ ИЗ РАЗНЫХ ТИПОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ВЕРНИНСКОЕ (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН, РОССИЯ)

© 2023 г. А. А. Котов<sup>a</sup>, \*, В. Ю. Прокофьев<sup>a</sup>, \*\*, А. В. Волков<sup>a</sup>, Т. М. Злобина<sup>a</sup>, К. Ю. Мурашов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: kotovaleksey@gmail.com

\*\*e-mail: vpr2004@rambler.ru

Поступила в редакцию 29.05.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 17.11.2022 г.

Изучены флюидные включения в кварце разных промышленных типов руд (прожилково-вкрапленном и жильном) месторождения золота Вернинское. Обнаружены заметные различия в величине некоторых физико-химических параметров и составе флюидов для разных типов руд. Флюиды, формировавшие золотоносные жилы, имеют несколько более высокую начальную температуру (356–246°C), более высокую плотность углекислоты в газовых включениях (1.00–0.84 г/см<sup>3</sup>) и более высокое флюидное давление (3170–1390 бар), по сравнению с флюидами, формировавшими прожилково-вкрапленные руды (температура 330–252°C, плотность CO<sub>2</sub> 0.87–0.54 г/см<sup>3</sup>, давление 1960–570 бар). Флюиды, образовавшие жилы, обогащены CO<sub>2</sub>, Sr, Ag, Ga, Ge, Mn, Fe, Ni, Sn, Ba, RЗЭ, а флюиды, формировавшие прожилково-вкрапленную минерализацию, обогащены HCO<sub>3</sub><sup>–</sup>, Br, Sb, V, Au. Полученную картину можно объяснить взаимодействием глубинного флюида с вмещающими терригенными породами в процессе рудоотложения. При формировании жильного кварца в относительно мощных трещинах флюид в меньшей степени изменял свои параметры при взаимодействии с вмещающими породами, чем при формировании кварца прожилково-вкрапленных руд, в узких трещинах. То есть, начальные параметры флюида, формировавшего жильный кварц, ближе всего к характеристикам флюида, осуществлявшего транспорт рудных компонентов, а сравнение этих данных с параметрами флюидов, формировавших прожилково-вкрапленную минерализацию, показывают их изменение в ходе рудоотложения. Сделан вывод об глубинном источнике минералообразующих флюидов и возможном участии в процессе минералообразования флюидов, связанных с гранитоидами.

**Ключевые слова:** месторождения золота в терригенных породах, флюидные включения, минералообразующий флюид, гранитоиды

**DOI:** 10.31857/S0016752523040076, **EDN:** JKYCSZ

Вернинское месторождение золота расположено в Бодайбинском золоторудном районе Ленской золотоносной провинции и находится в пределах Вернинско-Невского рудного поля, которое входит в Маракано-Тунгусский рудно-россыпной узел. Руды месторождения представлены двумя типами промышленной золотой минерализации: кварц-сульфидным прожилково-вкрапленным и кварцево-жильным. Локализация рудных тел этих типов пространственно совмещена в толще метаморфизованных терригенно-карбонатных пород неопротерозойского возраста, за исключением жильной зоны Первенец, обособленной в системе разломов. По минеральному составу месторож-

дение относится к кварцевой малосульфидной формации пирит-арсенопиритового типа (содержание сульфидов не превышает 3–5% (Мартыненко и др., 2017)).

Необходимо отметить, что в пределах Бодайбинского рудного района сосредоточена группа золоторудных месторождений, однако значительная часть ресурсов золота приурочена к сверхкрупному месторождению Сухой Лог (>1500 т Au). Второе по ресурсам в регионе – крупное месторождение золота Вернинское, общие запасы которого утверждены ФБУ ГКЗ Роснедра в 2015 г. в 328.3 т Au (Мартыненко и др., 2017).

Несмотря на длительную историю изучения золоторудных месторождений Бодайбинского рудного района, проблема их происхождения до сих пор остается дискуссионной. Среди основных точек зрения на генезис месторождений выделяется метаморфогенно-гидротермально-осадочная гипотеза, которая предполагает, что формирование месторождений связано с перераспределением осадочного золота под действием процессов регионального метаморфизма (Буряк, 1982; Буряк и др., 1997; Large et al., 2007). Другая гипотеза предполагает, что золотые месторождения района формировались в связи с палеозойским орогенезом и связанным с ним метаморфизмом (Шер, 1974; Дистлер и др., 1996; Кучеренко и др., 2012). Так же имеется полигенная метаморфогенно-плутоническая гипотеза, связывающая образование золоторудных месторождений района с процессами тектоно-магматической активизации (Рундквист, 1997; Крупные..., 2006). В современных публикациях месторождения золота Бодайбинского района обычно рассматриваются как месторождения золота в терригенных породах или орогенные месторождения золота (Yakubchuk et al., 2014; Goldfarb et al., 2014; Yudovskaya et al., 2016; Prokofiev et al., 2019; Chugaev et al., 2022, и др.).

В данной статье приведены новые данные по параметрам и составу рудообразующих флюидов, сформировавших два типа руд Вернинского месторождения.

## ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геолого-тектоническая позиция месторождения Вернинское, расположенного в северной части Байкало-Патомского пояса (БПП), отделенного от Сибирской платформы Аkitкано-Джербинским и Жуинским краевыми глубинными разломами, показана на рис. 1. Месторождение расположено в пределах Бодайбинского синклинария, формирование терригенных формаций которого завершилось в неопротерозое (Рыцк и др., 2011). Покровно-складчатое сооружение черносланцевых толщ синклинария, метаморфизованных до зеленосланцевой фации и смятых в складки более высокого порядка субширотного простирания, осложнено системой субширотных надвигов (Русинов и др., 2008).

Гранитоидные массивы ( $421 \pm 15$  млн лет (Зорин и др., 2008)), сформировавшиеся после складчатости, в основном обнажены в периферийной части Бодайбинского синклинария. Однако, по геофизическим данным, на глубине 6 км предполагается наличие ряда не выходящих на поверхность массивов гранитоидов (Distler et al., 2004), для которых информация о возрасте отсутствует. Непосредственно в пределах Вернинско-Невского рудного поля выходов магматических пород не обнаружено. Ближайший интрузив — Кон-

стантиновский шток — расположен в 6 км северо-западнее рудного поля и представляет собой локальный выход палеозойских гранитоидов ( $303 \pm 3$  млн лет (Рыцк и др., 2021)).

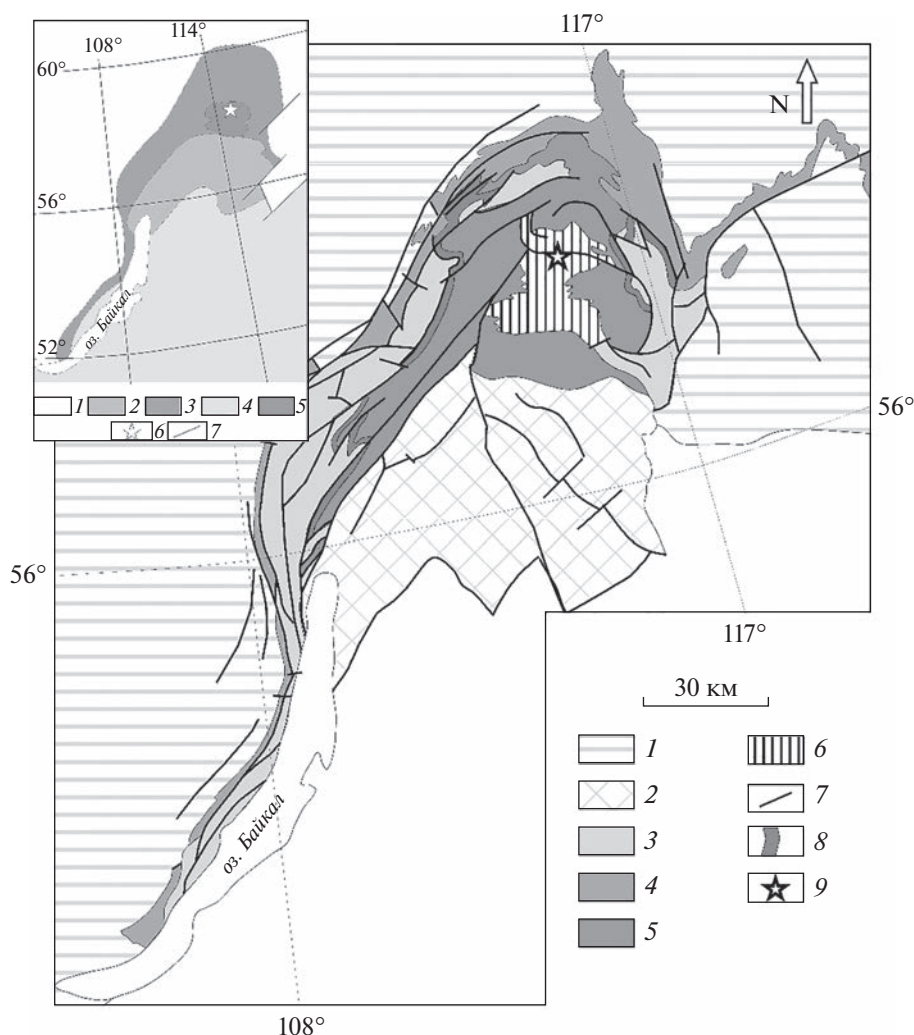
Главной рудовмещающей структурой месторождения является Вернинская антиклиналь второго порядка субширотного простирания, опрокинутая на юг (рис. 2), в пределах которой ритмично переслаиваются метаморфизованные отложения аунакитской свиты верхнего протерозоя. Строевание Вернинской антиклинали осложнено дислокационными зонами складчатых и разрывных нарушений.

Основной, по значению и масштабу распространения, тип золотой минерализации — прожилково-вкрапленный кварц-сульфидный — представлен тремя рудными зонами, приуроченными к зонам смятия в наиболее деформированных участках антиклинали. Сульфидная минерализация представлена арсенопиритом и пиритом, иногда с кварцем.

Рудные тела Вернинского месторождения локализованы в породах нижней и средней подсвиты аунакитской свиты. Основная рудовмещающая толща — нижняя подсвита аунакитской свиты ( $PR_3 au_1$ ) мощностью 170–300 м, разделена на три пачки и вскрыта в ядре антиклинали в северо-восточной и центральной частях площади.

Отложения первой пачки ( $PR_3 au_1^1$ ) представлены, в основном, серицит-кварцевыми песчаниками. Вторая пачка нижней подсвиты аунакитской свиты ( $PR_3 au_1^2$ ) вскрывается лишь на северо-восточном фланге рудного поля и на глубоких горизонтах, где слагает ядро Вернинской антиклинали. Она характеризуется ритмичным переслаиванием углеродистых филлитовидных сланцев, алевролитов и слюдисто-кварцевых песчаников. В пределах пачки выявлена кварцево-жильная зона Центральная. Третья пачка нижней подсвиты ( $PR_3 au_1^3$ ) представлена ритмичным переслаиванием горизонтов флишоидов, слагаемых преимущественно темноцветными углеродистыми филлитовидными сланцами и песчаниками, включая горизонт известковистых песчаников, который служит маркирующим горизонтом структуры складки. Суммарная мощность пачки — 300–400 м, она вмещает зоны прожилково-вкрапленной кварц-сульфидной минерализации с заключенными в них рудными зонами №№ 1 и 2.

Средняя подсвита аунакитской свиты ( $PR_3 au_2$ ), мощностью 140–200 м, сложена толщей флишоидных пород, представленных переслаиванием филлитовидных и кварц-серицитовых сланцев (60–70%) с мелкозернистыми карбонат-серицит-кварцевыми, реже кварцитовидными песчаниками (25–40%). Породы подсвиты широко



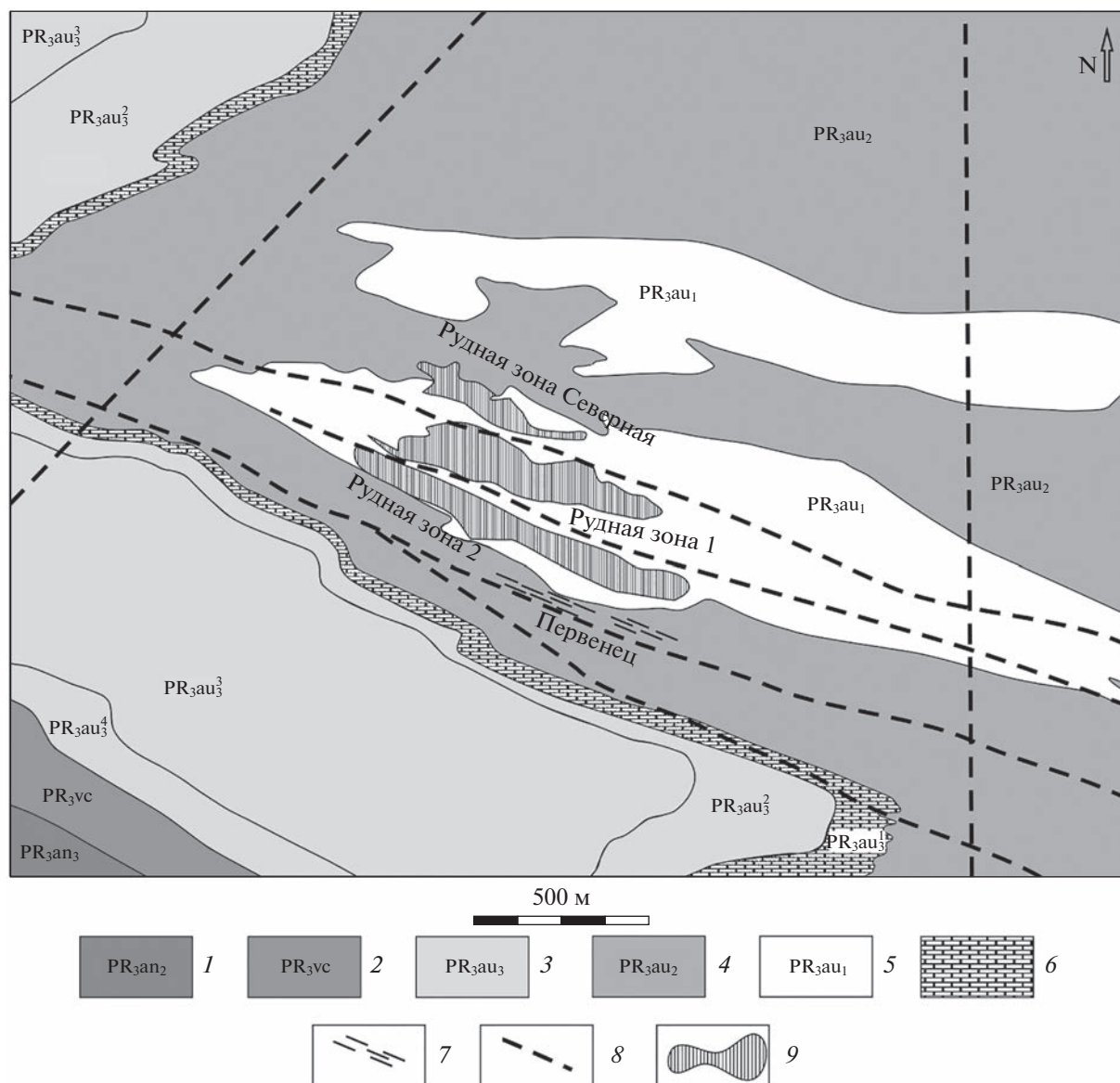
**Рис. 1.** Позиция Бодайбинского синклиория и месторождения Вернинское в Байкало-Патомском поясе (БПП) (по Рыцк и др., 2011 с добавлением). 1 – Сибирский кратон, 2 – Байкало-Муйский внутренний пояс, 3 – выступы ранне-докембрийского фундамента, 4 – прибайкальский краевой прогиб, 5 – неопротерозойские континентальные рифты (Олоkitский) и эпикратонные прогибы (Мамский, Патомский), 6 – Бодайбинская впадина, 7 – границы тектонических подразделений и разрывные нарушения, 8 – маркирующая толща низкокальциевых платобазальтов и продуктов размыва древней коры выветривания в структурах неопротерозойских рифтов и прогибов, 9 – Позиция месторождения Вернинского. На врезке: 1 – Сибирский кратон, 2 – БМП, 3 – БПП, 4 – Баргузинский супертеррейн, 5 – Бодайбинский синклиорий, 6 – позиция месторождения Вернинское, 7 – разломы.

развиты в пределах рудного поля, слагая ядра и крылья синклинальных структур подчиненного порядка. По минеральным ассоциациям, метасоматически преобразованные породы аунакитской свиты можно отнести к березитоподобным. Однако существенным отличием от березитизации является отсутствие околосильного окварцевания, типичного для березитов парагенезиса и слабо щелочной характер раствора (Русинов и др., 2008).

Кварцево-жильная минерализация проявлена в зонах разрывных тектонических нарушений, после формирования складчатости. Активизация глубинных северо-северо-западных разломов выявленных по геофизическим данным, привело к синрудным деформациям покровно-складчатой

толщи, что обусловило формирование флюидо-проводящей структуры (Котов и др., 2016).

На месторождении выделяются жильные зоны (Первенец, Центральная, Южная, Северная) субширотного простирания и отдельные кварцевые жилы субширотного, северо-западного и субмеридионального простираний. Кварцевые жилы на 95–99% состоят из молочно-белого кварца, в котором часто присутствуют ксенолиты вмещающих пород, гнезда карбонатов (кальцит, анкерит), а также мусковита. В кварце из кварцевых жил месторождения не проявлены следы наложенных послерудных процессов. Кварцевые зерна не несут следов послерудных деформаций в краевых зонах и в ядре (рис. 3). Из рудных мине-



**Рис. 2.** Схематическая карта Вернинского месторождения с рудными зонами (по Мартыненко и др., 2017, с добавлениями). 1–6 – метаморфизованные осадочные породы свит: 1 – Ангарской ( $PR_{3an}$ ), 2 – Вачской ( $PR_{3vc}$ ), 3–6 – Аунакитской ( $PR_{3au}$ ): 3, 4, 5 – чередование высокоуглеродистых филлитовых сланцев, слабоуглеродистых алевролитов, песчаников; 6 – горизонт известняков; 7 – жильная зона Первенец, 8 – разрывные нарушения, выявленные по геофизическим данным 9 – зоны прожилково-вкрапленных руд.

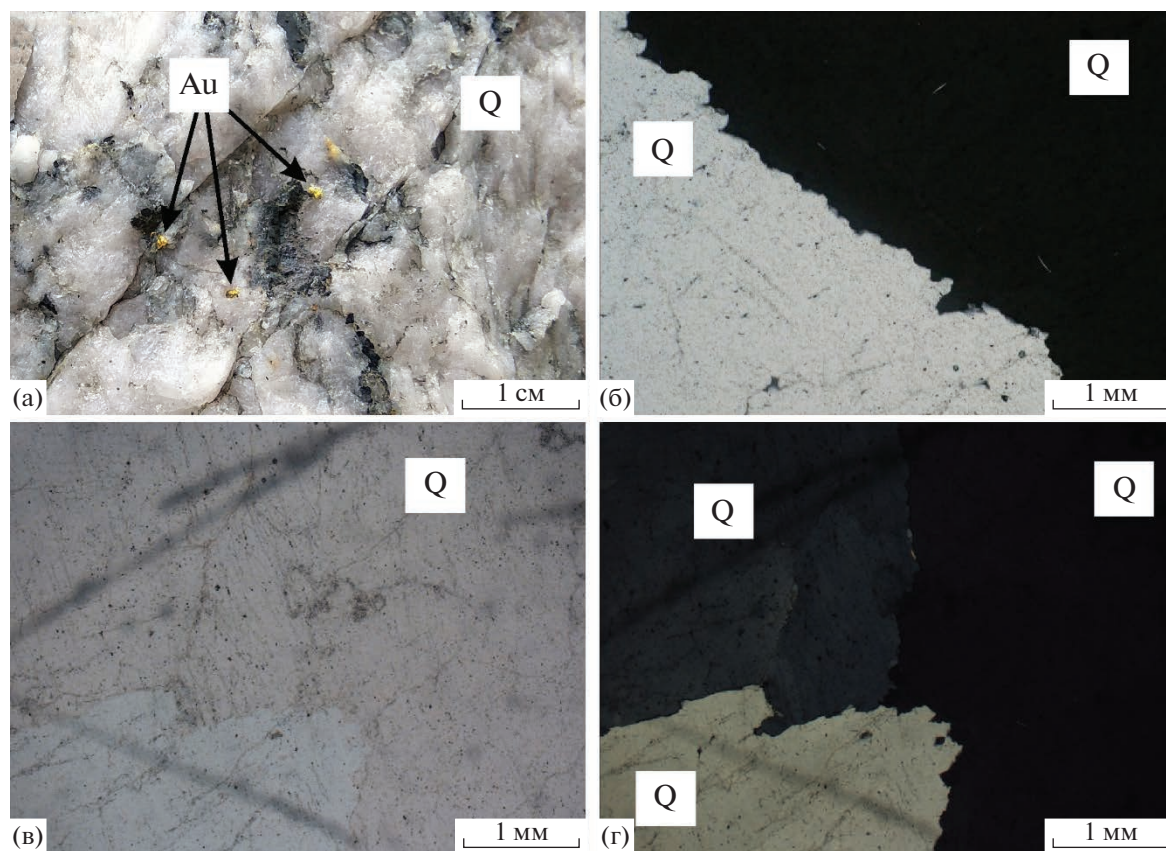
ралов, наиболее характерны арсенопирит, пирит, реже сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды и самородное золото (пробность 920–970‰) (Мартыненко и др., 2017).

Возраст минералообразования месторождения Вернинское, определенный по изотопным соотношениям Rb и Sr в образцах пород и вкрапленно-прожилковых сульфидных руд, изменяется от  $434 \pm 4$  до  $440 \pm 8$  млн лет (Chugaev et al., 2022). Данные о возрасте кварцевых жил Вернинского месторождения отсутствуют. Имеются оценки возраста вкрапленно-прожилковых и кварцево-

жильных руд месторождения Сухой Лог, расположенного в 12 км от месторождения Вернинское, в Хомолхинской свите ( $PR_{3hm1}$ ) Бодайбинского синклинория, которые составляют  $425 \pm 9$  и  $321 \pm 14$  млн лет соответственно (Laverov et al., 2007).

#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами работы была изучена представительная коллекция руд и пород месторождения Вер-



**Рис. 3.** Рудный кварц месторождения Вернинское. а — гнездовые скопления золота в кварце, б — крупнокристаллический агрегат кварца, николи скрещены, в — крупнокристаллический агрегат кварца из жилы, г — крупнокристаллический агрегат кварца, николи скрещены.

нинское — 30 образцов, отобранных в карьере месторождения из рудных тел № 1, № 2 и жильной зоны Первенец, а также из керна скважин из слепого рудного тела № 3. Пробы отбирались из прожилково-вкрапленных и жильных руд, а также из вмещающих пород на удалении от них.

Микротермометрические исследования индивидуальных флюидных включений проводились в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН с использованием микротермокамеры THMSG-600. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения температур фазовых переходов внутри включений в температурном интервале от  $-196$  до  $600^{\circ}\text{C}$ , наблюдать за ними при больших увеличениях и получать электронные микрофотографии. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Концентрация солей в растворе включений оценивалась по температурам плавления газгидратов (Collins, 1979). Концентрации углекислоты и метана в растворе оценивались также из объемных соотношений фаз и плотностей углекислоты и метана в газовой фазе. Давление оценивалось для гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы. Оценка концен-

траций солей и давлений флюида проводились с использованием программы FLINCOR (Brown, 1989). Точность определения температур гомогенизации ФВ составляла  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ , температур эвтектики  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ , температур плавления льда и газгидратов, а также температур гомогенизации углекислоты  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , плавления углекислоты  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , расчета солёности  $\pm 0.1$  мас. %-экв. NaCl, расчета плотностей флюида  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ , оценки давлений  $\pm 5$  бар.

Валовый анализ состава флюидов включений был выполнен из навесок  $0.5$  г класса  $-0.5 + 0.25$  мм мономинеральных фракций кварца и сфалерита в ЦНИГРИ (аналитик — Ю.В. Васюта) по методике, опубликованной в работе (Кряжев и др., 2006). Включения в кварце вскрывали термически при  $500^{\circ}\text{C}$ . Методом газовой хроматографии (хроматограф ЦВЕТ-100) определяли количество воды для расчета концентраций элементов в гидротермальном растворе. Анализировались также углекислота, метан и углеводороды. После приготовления водных вытяжек в растворе методом ионной хроматографии (хроматограф ЦВЕТ-3006, чувствительность  $0.01$  мг/л) определяли Cl,  $\text{SO}_4$  и F, методом ICP MS (масс-спектрометр Elan-6100) — K, Na, Ca, Mg и другие элементы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Изучены образцы кварца из прожилково-вкрапленных руд и жил месторождения Вернинское. В кварце из пяти проб были обнаружены флюидные включения размером более 10 мкм, пригодные для микротермометрических исследований. По фазовому составу при комнатной температуре первичные включения подразделены на 3 типа (рис. 4): 1) углекислотно-водные флюидные включения; 2) газовые флюидные включения, заполненные плотной углекислотой с небольшой каймой водного раствора, и 3) двухфазовые газово-жидкие включения водно-солевых растворов. Среди флюидных включений в соответствии с известными критериями (Реддер, 1987) были выделены первичные, первично-вторичные и вторичные флюидные включения. К первичным отнесены флюидные включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина, либо приуроченные к зонам роста. Вторичными считались включения, приуроченные к секущим минерал-хозяин микро-трещинам. Первично-вторичные флюидные включения приурочены к микро-трещинам, не достигающим внешних границ кристаллов и зерен, а по фазовому наполнению аналогичны первичным включениям. Нередко встречаются ассоциации газовых включений с углекислотно-водными включениями, что свидетельствует о гетерогенном состоянии минералообразующего флюида. Такие ассоциации захватываются на линии двухфазового равновесия, и температуры гомогенизации углекислотно-водных флюидных включений совпадают с температурами захвата включений (Реддер, 1987).

Получены данные исследования флюидных включений в кварце для обоих типов промышленных руд месторождения (табл. 1, 2, рис. 5–7).

По данным изучения более 100 индивидуальных флюидных включений в кварце *прожилково-вкрапленных руд* (табл. 1, рис. 5), температуры гомогенизации первичных и первично-вторичных флюидных включений типа 1 в кварце изменяются в интервале температур от 252 до 330°C. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 4.0–8.1 мас. %-экв. NaCl. Концентрация углекислоты в рудообразующем флюиде достигала 1.4–8.6 моль/кг р-ра, а метана 0.7–1.0 моль/кг р-ра. Плотность углекислотно-водного флюида 0.88–1.04 г/см<sup>3</sup>. Судя по величине температуры эвтектики (от –25 до –32°C), в рудообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды и гидрокарбонаты натрия, магния и железа.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях типа 2, сингенетичных включениям 1 типа, происходит в жидкую фазу при температурах от +9.3 до +30.8°C. Плавление углекислоты

наблюдается в интервале температур от –56.9 до –64.7°C. Температуры плавления ниже температуры плавления чистой углекислоты (–56.6°C) связаны с наличием в ней примесей метана или азота. Плотность углекислоты изменяется от 0.54 до 0.87 г/см<sup>3</sup>.

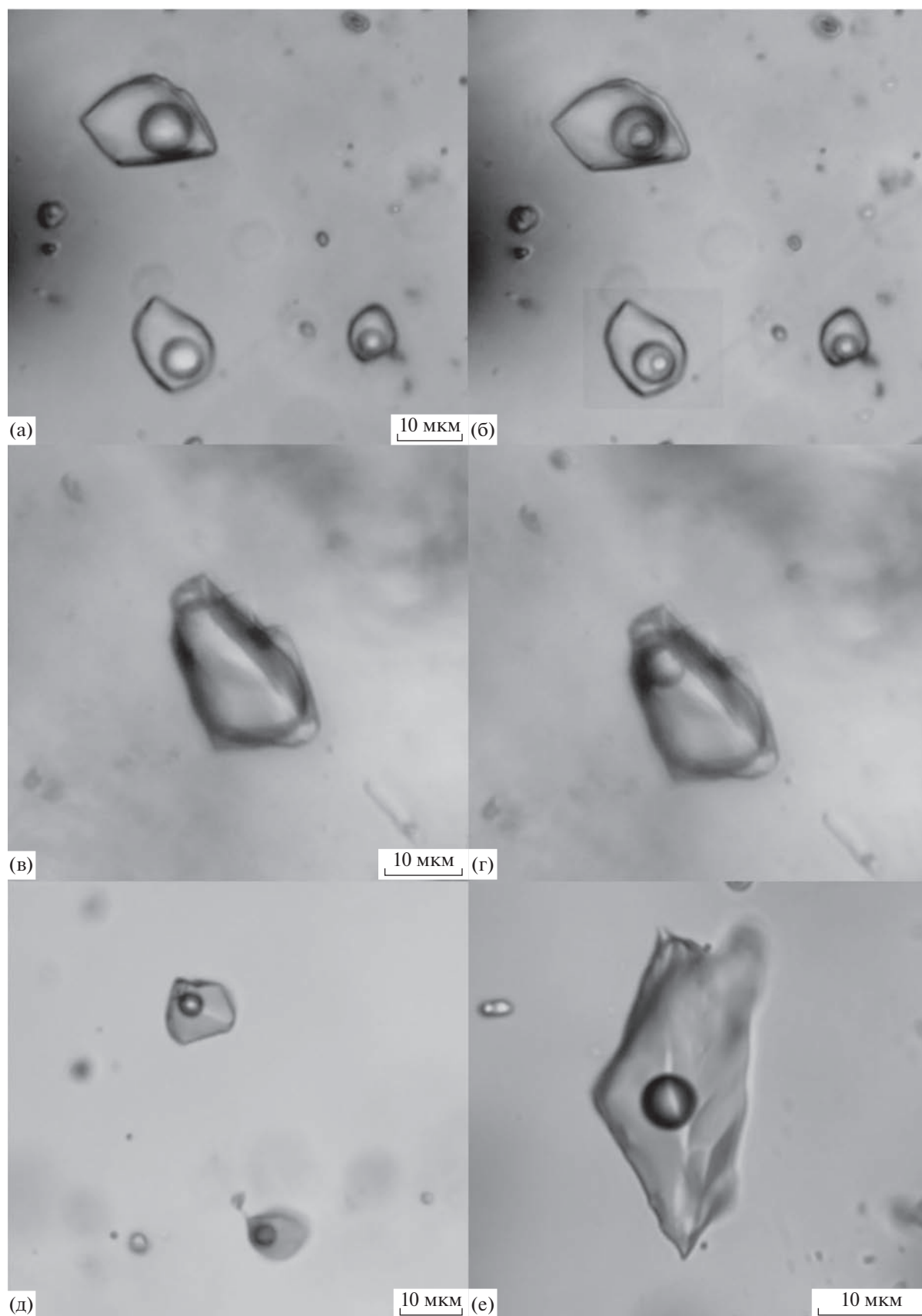
Давление флюида оценивалось для ассоциаций флюидных включений типов 1 и 2 в кварце, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида. Оно рассчитывалось методом пересечения изохор и изотерм для всего интервала плотностей углекислотного флюида и температур гомогенизации включений типа 1 в кварце прожилково-вкрапленных руд (рис. 6). Величина давления изменяется от 570 до 1960 бар при изменении температур от 252 до 330°C.

Вторичные включения типа 3 гомогенизируются при температуре 261°C. Они содержат водный раствор, в котором преобладают хлориды натрия, железа и кальция (температура эвтектики –26°C) с концентрацией солей 5.3 мас. %-экв. NaCl. Плотность водного флюида 0.83 г/см<sup>3</sup>.

Химический состав растворов из флюидных включений в кварце *прожилково-вкрапленных руд* Вернинского месторождения приведен в табл. 2 и на рис. 7. Во флюиде среди катионов главную роль играют (г/кг H<sub>2</sub>O): Na (6.7), а K (0.22) и Mg (0.11) находятся в подчиненном количестве. Установлено наличие таких компонентов, как (г/кг H<sub>2</sub>O): Cl<sup>–</sup> (1.2), HCO<sub>3</sub><sup>–</sup> (16.5), CO<sub>2</sub> (209) и CH<sub>4</sub> (0.2), а также B (0.3) и Br (0.5). Кроме того, в составе флюида выявлены многие микрокомпоненты (мг/кг H<sub>2</sub>O): As (146), Li (16), Rb (0.5), Cs (1.6), Sr (0.9), Mo (0.09), Ag (0.12), Sb (38.9), Zn (7.0), Cd (0.2), Bi (0.01), Ga (0.2), Ge (1.03), Fe (12.2), Co (0.17), Ni (0.6), V (3.2), Cr (0.2), Y (0.05), Zr (0.03), W (0.73), Au (0.124), Tl (0.012) и REE (0.06).

По данным изучения около 200 индивидуальных флюидных включений (табл. 1, рис. 5) температуры гомогенизации первичных и первично-вторичных флюидных включений типа 1 в *кварце из рудных жил* изменяются в интервале температур от 246 до 356°C. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа 1.4–7.5 мас. %-экв. NaCl. Концентрация углекислоты во флюиде достигала 1.4–8.1 моль/кг р-ра, а метана 0.2–1.2 моль/кг р-ра. Плотность углекислотно-водного флюида 0.81–1.05 г/см<sup>3</sup>. Судя по величине температуры эвтектики (от –25 до –32°C), в рудообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды и гидрокарбонаты натрия, магния и железа.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях типа 2, сингенетичных включениям 1 типа, происходит в жидкую фазу при температурах от –13.7 до +12.5°C. Плавление углекислоты наблюдается в интервале температур от –57.9



**Рис. 4.** Флюидные включения в кварце Вернинского месторождения. а, б – углекислотно-водные типа 1 (а –  $+25^{\circ}\text{C}$ , б –  $+3^{\circ}\text{C}$ ), в, г – газовые типа 2 (а –  $+20^{\circ}\text{C}$ , б –  $-15^{\circ}\text{C}$ ), д, е – двухфазовые водно-солевые. Масштаб 10 мкм.

Таблица 1. Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце золотых руд месторождения Вернинское

| № пробы                             | Тип включения(*) | n  | T <sub>гом.</sub> , °C | T <sub>эвт.</sub> , °C | T <sub>пл. льда</sub> , °C | T <sub>пл. CO<sub>2</sub></sub> , °C | T <sub>гом. CO<sub>2</sub></sub> , °C | T <sub>пл. газ.</sub> , °C | С солей, мас. % экв. NaCl | С CO <sub>2</sub> моль/кг р-ра | С CH <sub>4</sub> моль/кг р-ра | d, г/см <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|------------------|----|------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Кварц из прожилково-вкрапленных руд |                  |    |                        |                        |                            |                                      |                                       |                            |                           |                                |                                |                      |
| В10/32                              | 1 П              | 53 | 330–286                | –25...–32              | –3.8...–5.5                | –57.1...–58.4                        | 0.9...10.2 Ж                          | 8.7–10.6                   | 5.4–4.0                   | 8.6–8.0                        | 1.0–0.9                        | 1.00–1.04            |
|                                     | 2 П              | 10 | –                      | –                      | –                          | –56.9...–59.5                        | 9.3...30.8 Ж                          | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.54–0.87            |
|                                     | 1 П–В            | 12 | 258–252                | –30                    | –4.0                       | –60.8                                | –2.7 Г                                | 10.8                       | 6.1                       | 1.4                            | 0.7                            | 0.88                 |
|                                     | 2 П–В            | 2  | –                      | –                      | –                          | –64.7                                | 11.9 Ж                                | 7.9                        | –                         | –                              | –                              | 0.85                 |
|                                     | 2 В              | 8  | –                      | –                      | –                          | –57.4...–59.1                        | 7.9...28.1 Г                          | –                          | –                         | –                              | –                              | –                    |
| В14/21                              | 1 П              | 12 | 329–276                | –27...–31              | –3.7...–5.2                | –58.1...–58.4                        | 5.7...9.8 Ж                           | 9.3–10.0                   | 5.9–8.1                   | 6.0–7.3                        | 0.7–0.9                        | 1.01–1.04            |
|                                     | 2 П              | 5  | –                      | –                      | –                          | –57.2...–57.7                        | 10.1...28.5 Ж                         | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.64–0.86            |
|                                     | 2 В              | 3  | –                      | –                      | –                          | –57.3                                | 24.4 Г                                | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.24                 |
|                                     | 3 В              | 3  | 261                    | –26                    | –3.3                       | –                                    | –                                     | –                          | 5.3                       | –                              | –                              | 0.83                 |
| Жильный кварц                       |                  |    |                        |                        |                            |                                      |                                       |                            |                           |                                |                                |                      |
| В14/17                              | 1 П              | 46 | 300–273                | –29...–32              | –3.4...–4.6                | –58.4...–59.0                        | 0.4...13.0 Ж                          | 8.8–10.0                   | 1.4–6.1                   | 3.3–7.3                        | 0.3–0.8                        | 1.00–1.05            |
|                                     | 2 П              | 16 | –                      | –                      | –                          | –57.6...–59.6                        | –2.4...5.9 Ж                          | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.89–0.94            |
|                                     | 2 В              | 3  | –                      | –                      | –                          | –57.6                                | 28.3 Г                                | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.30                 |
|                                     | 3 В              | 18 | 192–136                | –26...–32              | –3.4...–3.5                | –                                    | –                                     | –                          | 5.5–5.6                   | –                              | –                              | 0.92–0.97            |
| В14/41                              | 1 П              | 24 | 356–307                | –27...–30              | –4.1...–5.0                | –57.5...–60.2                        | 1.4...7.4 Ж                           | 8.7–10.6                   | 5.1–4.7                   | 8.1–5.6                        | 0.9–0.6                        | 1.02–1.05            |
|                                     | 2 П              | 13 | –                      | –                      | –                          | –57.4                                | 2.1 Ж                                 | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.92                 |
|                                     | 1 П–В            | 19 | 259–246                | –26                    | –2.9                       | Не опр.                              | 15.2 Г                                | 8.7                        | 4.4                       | 2.0                            | 0.6                            | 0.87                 |
|                                     | 1 В              | 4  | 179                    | –31                    | –3.4                       | –58.0                                | 28.5 Ж                                | 7.8                        | 5.0                       | 2.3                            | 0.2                            | 1.03                 |
|                                     | 3 В              | 3  | 143                    | –33                    | –3.1                       | –                                    | –                                     | –                          | 5.0                       | –                              | –                              | 0.96                 |
| П14/4                               | 1 П              | 26 | 301–272                | –25...–30              | –3.7...–4.8                | –57.2...–60.6                        | –13.5...24.5 Ж                        | 9.0–11.8                   | 1.6–7.5                   | 5.9–7.1                        | 0.7–1.1                        | 0.98–1.04            |
| кварц зоны Первенец                 | 2 П              | 14 | –                      | –                      | –                          | –57.9...–59.4                        | –13.7...12.5 Ж                        | –                          | –                         | –                              | –                              | 0.84–1.00            |
| кварц зоны Первенец                 | 1 П–В            | 5  | 272                    | –29                    | –3.7                       | –59.7                                | –41.7 Г                               | 12.0                       | 5.9                       | 1.4                            | 1.2                            | 0.81                 |
|                                     | 3 В              | 3  | 145                    | –28                    | –3.9                       | –                                    | –                                     | –                          | 6.2                       | –                              | –                              | 0.97                 |

Примечания. (\*) 1 – углекислотно-водно-солевые; 2 – газовые; 3 – газово-жидкие водно-солевых растворов. Генетический тип включений. П – первичные, П–В – первично-вторичные, В – вторичные. Г – гомогенизация углекислоты в газ, Ж – в жидкость, и – количество включений. Т<sub>гом</sub> – температура гомогенизации, Т<sub>эвт</sub> – температура эвктики, Т<sub>пл</sub> – температура плавления, С – соленость, d – плотность флюида.

**Таблица 2.** Химический состав рудообразующих флюидов в жильном и прожилково-жильном типах руд Вернинского месторождения

| Компонент                                   | Жильный<br>В14/41 | Прожилково-<br>вкрапленный В10/32 |
|---------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Макрокомпоненты, г/кг воды                  |                   |                                   |
| CO <sub>2</sub>                             | 265.4             | 208.5                             |
| CH <sub>4</sub>                             | 0.16              | 0.18                              |
| Cl <sup>-</sup>                             | 1.24              | 1.24                              |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>               | 8.56              | 16.47                             |
| Na                                          | 3.07              | 6.70                              |
| K                                           | 0.08              | 0.215                             |
| Ca                                          | 0.26              | —                                 |
| Mg                                          | 0.33              | 0.11                              |
| Микрокомпоненты, 10 <sup>-3</sup> г/кг воды |                   |                                   |
| Br                                          | 84.8              | 460.4                             |
| As                                          | 134.5             | 146.4                             |
| Li                                          | 26.5              | 16.1                              |
| B                                           | 268.7             | 282.9                             |
| Rb                                          | 0.85              | 0.53                              |
| Cs                                          | 1.03              | 1.62                              |
| Sr                                          | 17.5              | 0.88                              |
| Mo                                          | —                 | 0.09                              |
| Ag                                          | 1.86              | 0.12                              |
| Sb                                          | 8.85              | 38.9                              |
| Zn                                          | 14.3              | 7.02                              |
| Cd                                          | —                 | 0.19                              |
| Pb                                          | 0.22              | —                                 |
| Bi                                          | —                 | 0.01                              |
| U                                           | 0.03              | —                                 |
| Ga                                          | 1.01              | 0.21                              |
| Ge                                          | 1.89              | 1.03                              |
| Mn                                          | 36.5              | —                                 |
| Fe                                          | 38.1              | 12.2                              |
| Co                                          | 0.30              | 0.17                              |
| Ni                                          | 5.81              | 0.60                              |
| V                                           | 0.92              | 3.21                              |
| Cr                                          | 0.71              | 0.21                              |
| Y                                           | —                 | 0.05                              |
| Zr                                          | —                 | 0.03                              |
| Sn                                          | 6.2               | —                                 |
| Ba                                          | 5.36              | —                                 |
| W                                           | 0.37              | 0.73                              |
| Au                                          | 0.031             | 0.124                             |
| Tl                                          | 0.016             | 0.012                             |
| REE                                         | 0.404             | 0.062                             |
| K/Rb                                        | 94                | 406                               |

до  $-59.6^{\circ}\text{C}$ . Температуры плавления ниже температуры плавления чистой углекислоты ( $-56.6^{\circ}\text{C}$ ) связаны с наличием в ней примесей метана или азота. Плотность углекислоты изменяется от 0.84 до 1.00 г/см<sup>3</sup>.

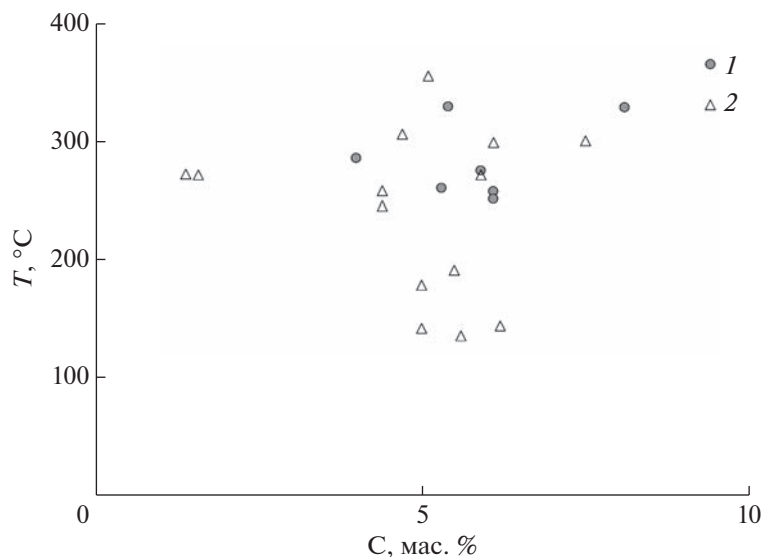
Давление флюида оценивалось для ассоциаций флюидных включений типов 1 и 2 в кварце, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида. Оно рассчитывалось методом пересечения изохор и изотерм для всего интервала плотностей углекислотного флюида и температур гомогенизации включений типа 1 в кварце жил. Величина давления изменяется от 1390 до 3170 бар при изменении температур от 246 до  $356^{\circ}\text{C}$  (рис. 6).

Вторичные включения типа 3 гомогенизируются при температурах 192– $136^{\circ}\text{C}$ . Они содержат водный раствор, в котором преобладают хлориды натрия, железа и кальция (температуры эвтектики от  $-26$  до  $-32^{\circ}\text{C}$ ) с концентрацией солей 5.0–6.2 мас. %-экв. NaCl. Плотность водного флюида 0.92–0.97 г/см<sup>3</sup>.

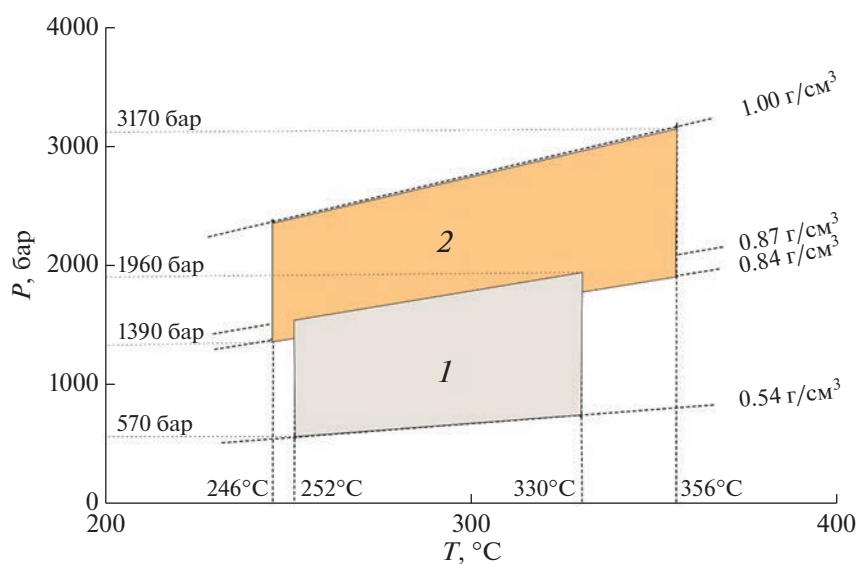
Химический состав растворов из включений в жильном кварце Вернинского месторождения приведен в табл. 2 и на рис. 7. Во флюиде среди катионов главную роль играют (г/кг H<sub>2</sub>O): Na (3.1), а K (0.08), Ca (0.26) и Mg (0.33) находятся в подчиненном количестве. Установлено наличие таких компонентов, как (г/кг H<sub>2</sub>O): Cl<sup>-</sup> (1.2), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (8.6), CO<sub>2</sub> (265) и CH<sub>4</sub> (0.2), а также B (0.3) и Br (0.1). Кроме того, в составе флюида выявлены многие микрокомпоненты (мг/кг H<sub>2</sub>O): As (135), Li (27), Rb (0.9), Cs (1.0), Sr (17.5), Ag (1.9), Sb (8.9), Zn (14.3), Pb (0.22), U (0.03), Ga (1.01), Ge (1.9), Mn (36.5), Fe (38.1), Co (0.30), Ni (5.8), V (0.9), Cr (0.7), Sn (6.2), Ba (5.4), W (0.37), Au (0.031), Tl (0.016) и REE (0.40).

В целом физико-химические параметры и химический состав флюида, формировавшего прожилково-вкрапленные и жильные руды месторождения Вернинское, близки, что свидетельствует об их образовании в единой флюидной системе (табл. 1, 2, рис. 5, 6), однако между этими параметрами имеются некоторые различия, заметно превышающие ошибку в определении.

Данные исследования флюидных включений показали, что флюиды, формировавшие жильные руды, имеют более высокую начальную температуру ( $356\text{--}246^{\circ}\text{C}$ ), более высокую плотность углекислоты в газовых включениях (1.00–0.84 г/см<sup>3</sup>) и флюидное давление (3170–1390 бар), по сравнению с флюидами, формировавшими прожилково-вкрапленные руды (температура  $330\text{--}252^{\circ}\text{C}$ , плотность CO<sub>2</sub> 0.87–0.54 г/см<sup>3</sup>, давление 1960–570 бар). Флюиды, формировавшие жильные руды, обогащены CO<sub>2</sub>, Sr, Ag, Ga, Ge, Mn, Fe, Ni, Sn, Ba, PЗЭ, а флюиды, формировавшие прожил-



**Рис. 5.** Диаграмма “температура—концентрация солей” для рудообразующих флюидов месторождения Вернинское. 1 — прожилково-вкрапленные руды, 2 — жильные руды.



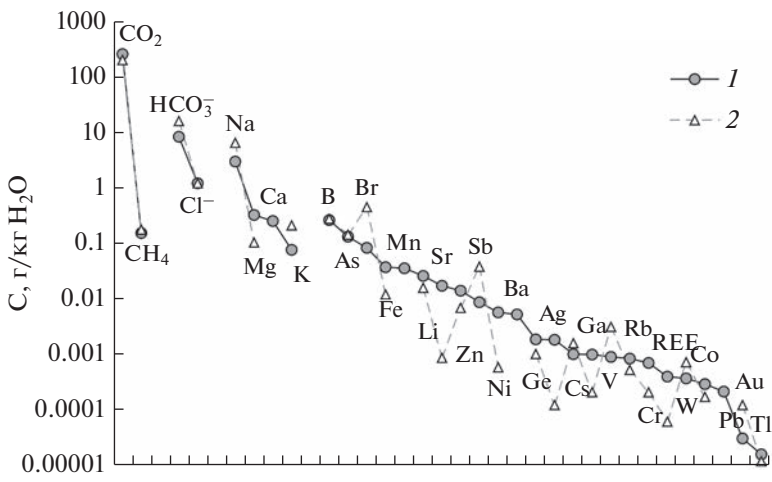
**Рис. 6.** Оценка давлений минералообразующих флюидов разных типов руд месторождения Вернинское: 1 — прожилково-вкрапленные руды, 2 — жильные руды.

ково-вкрапленную минерализацию, обогащены  $\text{HCO}_3^-$ , Br, Sb, V, Au.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные исследования флюидных включений показали, что минералообразующие флюиды Вернинского месторождения были средне-температурными, высоко барическими, слабо минерализованными углекислотно-водными хло-

ридно-гидрокарбонатными. Такие флюиды, содержащие небольшие концентрации солей и высокие — углекислоты, характерны для состава рудообразующих флюидов орогенных месторождений золота (Ridley, Diamond, 2000; Bodnar et al., 2014; Goldfarb, Groves, 2015; Prokofiev, Naumov, 2020 и др.). Класс орогенных месторождений золота (преимущественного архейских и фанерозойских) был выделен сравнительно недавно научным коллективом иностранных геологов (Groves et al., 1998 и др.). Изменившиеся за два десятилетия представления о месторождениях этого



**Рис. 7.** Химический состав рудообразующих флюидов, формировавших прожилково-вкрапленные (1 образец B10/32) и жильные (2 образец B14/4) руды месторождения Вернинское.

класса связаны, в первую очередь, с переоценкой глубины рудообразования, вертикальный диапазон которой увеличен в последние годы в два раза — с 10 до 20 км — от мезо- до гипотермального (Goldfarb, Groves, 2015; Goldfarb et al., 2014 и др.). Последняя модель формирования орогенных месторождений (Groves et al., 2020), предполагает глубинный (нижнекоровый или мантийный) источник рудообразующего флюида и тектонический контроль процесса формирования золотой минерализации этого типа. В рамках этой модели установленные нами различия в параметрах и составе минералообразующих флюидов, формировавших разные типы руд Вернинского месторождения можно объяснить взаимодействием глубинного флюида с вмещающими терригенными породами в процессе рудоотложения. При формировании жильного кварца в относительно мощных трещинах флюид мог в меньшей степени изменять свои параметры при взаимодействии с вмещающими породами, чем кварц прожилково-вкрапленных руд, отлагавший минерализацию в узких трещинах, и, соответственно, на большей поверхности взаимодействовавший с вмещающими породами.

**Таблица 3.** Изотопный состав углерода углекислоты газовых включений в кварце прожилково-вкрапленных (1) и жильных (2) руд Вернинского месторождения золота

| Проба   | Тип руд | $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ |
|---------|---------|-------------------------------------|
| В 10/32 | 1       | -1.9                                |
| В 14/21 | 1       | -2.9                                |
| В 14/17 | 2       | -3.4                                |
| В 14/41 | 2       | -4.1                                |
| П 14/4  | 2       | -3.2                                |

Т.е. начальные параметры флюида, формировавшего жильный кварц, были ближе всего к характеристикам флюида, осуществлявшего транспорт рудных компонентов, а сравнение этих данных с параметрами флюидов, формировавших прожилково-вкрапленную минерализацию, показывают их изменение в ходе рудоотложения. В частности, можно сделать заключение о том, что углекислота во флюиде была глубинная, а гидрокарбонат-ион образовался при реакции флюида с карбонатной составляющей вмещающих пород.

Максимальная величина оценок флюидного давления (3170 бар), связанная с присутствием в жильном кварце чисто углекислотных флюидных включений с максимально высокой плотностью углекислоты (1.00 г/см<sup>3</sup>), согласуется с такой картиной и позволяет оценить глубину источника флюидов примерно в 12 км при геобарическом градиенте 260 бар на 1 км.

Если соотнести ранее опубликованные (Prokofiev et al., 2019) данные по изотопному составу углерода углекислоты из флюидных включений в кварце Вернинского месторождения с типом руд (табл. 3), то они также обнаруживают различия в составе флюидов. Для углекислоты из кварца из прожилково-вкрапленных руд  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  изменяется от -2.9 до -1.9, а из жил — от -4.1 до -3.2, что подтверждает вывод об изменении состава флюидов при формировании разных типов руд Вернинского месторождения. Общий диапазон значений изотопного состава углерода соответствует магматическому (гранитоидному) или даже мантийному источнику  $\text{CO}_2$  (Hoefs, 2009). В пользу участия магматических флюидов в процессе формирования жильных руд может свидетельствовать низкая величина К/Rb отношения (Irber, 1999), равная 94 для флюида, формировавшего

жильные руды (обр. В14/41, жильные руды, табл. 2). Во флюиде, формировавшем прожилково-вкрапленные руды, K/Rb отношение выше и составляет 406, что может быть связано с взаимодействием флюида с вмещающими породами. Отметим, что участие флюидов, связанных с гранитным очагом, наряду с флюидами из других источников, было показано для орогенных месторождений золота Западной Африки (Lawrence et al., 2013).

Таким образом, проведенные исследования показали наличие различий в физико-химических параметрах и химическом составе флюидов, формировавших разные типы руд Вернинского месторождения золота. Полученные результаты не противоречат как полигенной метаморфогенно-плутоногенной гипотезе (Рундквист, 1997; Крупные..., 2006), связывающей образование золоторудных месторождений Бодайбинского района с процессами тектоно-магматической активизации, так и модели орогенных месторождений золота (Groves et al., 2020).

*Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИГЕМ РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава газозо-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*. (8), 16–27.
- Буряк В.А. (1982) *Метаморфизм и рудообразующие процессы*. М.: Наука, 157 с.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 156 с.
- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. и др. (1996) Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*. **38**(6), 467–484.
- Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008) Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны. *ДАН Науки о земле*. **423**(2), 228–233.
- Котов А.А., Прокофьев В.Ю., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. (2016) Влияние палеосейсмогенных факторов на формирование золоторудных месторождений в зонах дислокаций. *Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Материалы докладов III Всеросс. конференции (19–23 сентября 2016 г., Иркутск)*. Иркутск: ИЗК РАН, 156–159.
- Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. (2006) М.: ИГЕМ РАН. **2**, 672.
- Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. (2006) Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов. *Вестник МГУ. Серия 4 Геология*. **4**, 30–36.
- Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верховин А.В. (2012) Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский район). *Известия Томского политехнического университета*. **321**(1), 22–33.
- Мартыненко В.Г., Домашов А.В., Дейс С.Ю., Корзаков А.Г., Кушнарев П.И. (2017) Основные черты геологического строения Вернинского месторождения. *Разведка и охрана недр*. **4**, 1–8.
- Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М.: Мир, **1**, 560.
- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Богомолов Е.С., Котов А.Б. (2011) Изотопная структура и эволюция коры Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геотектоника*. **5**, 17–51.
- Рыцк Е.Ю., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Кузнецов А.Б., Родионов Н.В., Андреев А.А., Федосенко А.М. (2021) Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия. *ДАН. Науки о земле*. **496**(2), 169–175.
- Рундквист Д.В. (1997) Фактор времени в образовании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, мегаэтапы и стадии рудообразования. *Геология рудных месторождений*. **39**(1), 11–24.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. (2008) Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений*. **50**(1), 3–46.
- Шер С.Д. (1974) *Металлогения золота*. М.: Недра.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. (2014) *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Treatise on Geochemistry*, 2nd Edition, Elsevier, 119–142.
- Brown P. (1989) FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Am. Mineral*. **74**, 1390–1393.
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022)  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  and Rb–Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log – style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geol. Rev.* **144**(104855).
- Collins P.L.P. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.* **74**, 1435–1444.
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L. et al. (2004) Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.* **24**(12), 7–44.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. (2015) Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*. **233**, 2–26.
- Goldfarb R.J., Taylor R., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. (2014) Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Res.* **25**, 48–102.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre–Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) Orogenic gold deposits:

- A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* **13**, 7-27.
- Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. (2020) A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Miner. Deposita*. **55**, 275-292.
- Hoefs J. (2009). Stable Isotope Geochemistry. Springer, 285.
- Irber W. (1999) The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **63**(3/4), 489-508
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. (2007). Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, east Siberia: results of isotope-geochronological study. *Dokl. Earth Sci.* **415**, 810-814.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F. et al. (2007) Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia *Econ. Geol.* **102**, 1233-1267.
- Lawrence D.M., Treloar P.J., Rankin A.H., Boyce A., Harbidge P. (2013) A fluid inclusion and stable isotope study at the Loulo mining district, Mali, West Africa: Implications for multifluid sources in the generation of orogenic gold deposits. *Econ. Geol.* **108**, 229-257.
- Prokofiev V.Yu., Naumov V.B. (2020) *Physicochemical Parameters and Geochemical Features of Ore-Forming Fluids for Orogenic Gold Deposits Throughout Geological Time Mineral.* 10(1), 50.
- Prokofiev V.Yu., Safonov Yu.G., Lüders V., Borovikov A.A., Kotov A.A., Zlobina T.M., Murashov K.Yu., Yudovskaya M.A., Selektor S.L. (2019) The sources of mineralizing fluids of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom and Muya areas, Siberia: Constraints from the C and N stable isotope compositions of fluid inclusions. *Ore Geol. Rev.* **111**, 102988.
- Ridley J.R., Diamond L.W. (2000) Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models *Gold in 2000. SEG Reviews.* **13**, 141-162.
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. (2014) Results of pilot Re—Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geol. Rev.* **59**, 21-28.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geosci. Front.* **7**(3), 453-481.