

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ МАНИТАНЫРДСКОГО РАЙОНА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

© 2010 г. Н. В. Сокерина\*, Н. Н. Зыкин\*\*, Л. И. Ефанова\*\*\*, С. Н. Шанина\*, Ю. С. Симакова\*

\*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН  
167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54  
E-mail: sokerina@geo.komisc.ru

\*\*Московский государственный университет  
119899, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ

\*\*\*ЗАО Голд Минералс  
167000, г. Сыктывкар, ул. Оплеснина, 54

Поступила в редакцию 02.06.2009 г.

Манитанырдский рудный район в настоящее время характеризуется наличием нескольких рудопроявлений золота. Нами изучались рудопроявление Верхненияюское-1 и месторождение Верхненияюское-2. Рудные зоны представляют собой линейно вытянутые участки рассланцованных пород, в которых сосредоточены чаще всего жилы и прожилки кварц-сульфидного, кварцевого и кварц-хлоритового состава. Во вмещающих породах оруденение бедное и представлено тонкой вкрапленностью сульфидов по сланцеватости. Для определения условий минералообразования нами исследовались газовой-жидкие включения в таких прозрачных минералах, как кварц, кальцит, эпидот, аксинит, входящих в состав золоторудных и незолоторудных кварцевых жил. Было установлено, что золоторудный и незолоторудный кварц не различаются по термобарогеохимическим показателям. Для них характерны однофазовые водные включения, температуры гомогенизации двухфазовых включений равны приблизительно 70–400°C. Расчетное давление составляет 1–250 кг/см<sup>2</sup>. Газово-жидкие включения в золоторудном и незолоторудном кварце имеют почти одинаковую соленость равную 0–17 и 4–16.5 вес. % (NaCl экв.), соответственно. Солевой состав во включениях также похож. Температура эвтектики во включениях близка: –23 и –35°C, что соответствует водно-солевым системам NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O и NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. Изотопный состав включений в кварце свидетельствует о наличии двух источников минералообразования: мантийном и коровом.

Ключевые слова: *рудопроявления золота, гомогенизация, газовой-жидкие включения, изотопный состав, температура эвтектики, хроматография.*

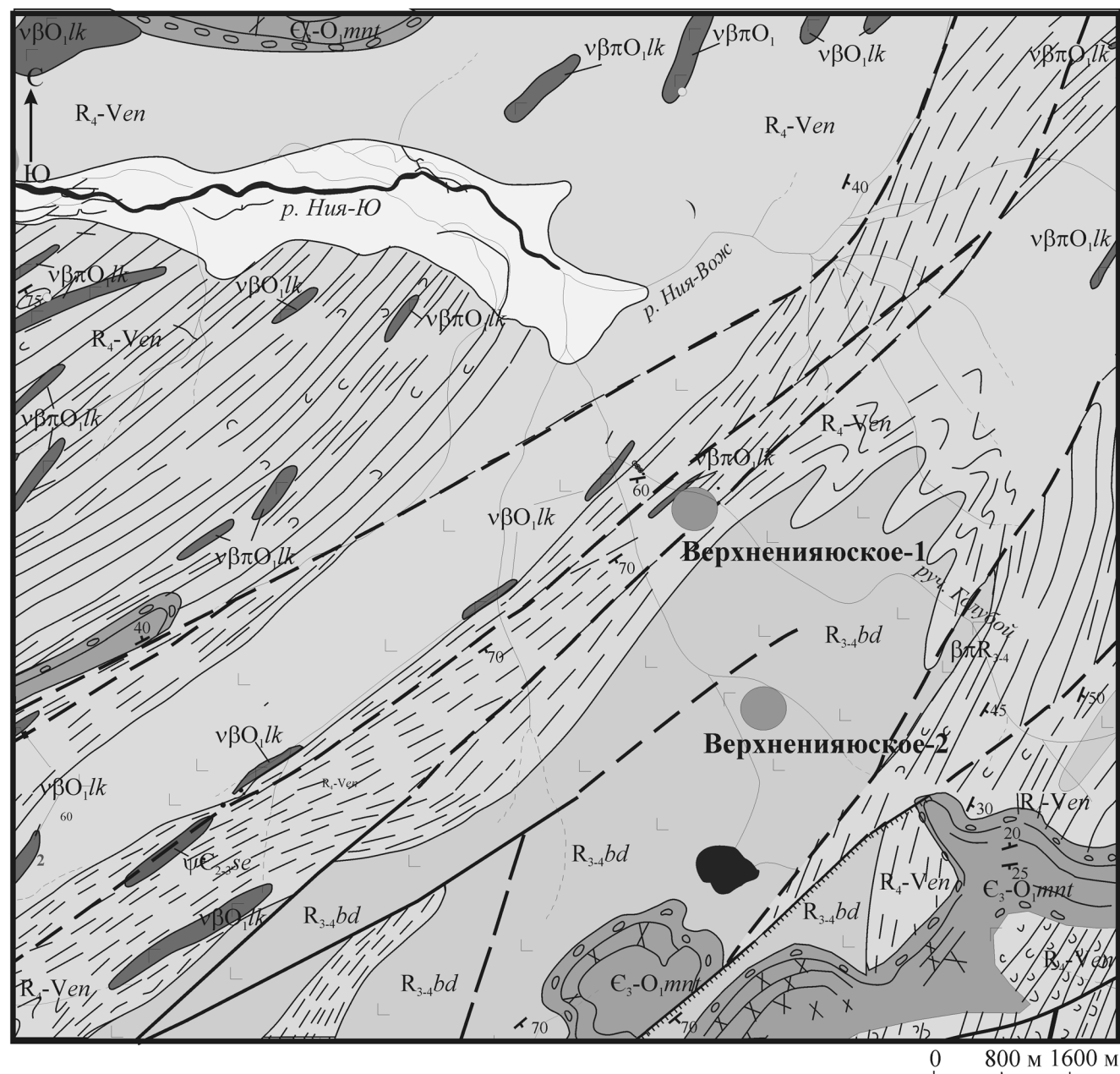
### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Манитанырдский рудный район в настоящий момент характеризуется наличием месторождений и ряда рудопроявлений золота в позднерифейско-вендско-раннекембрийских отложениях. Он входит в состав Полярноуральской медь-серебряно-золотой минералогической зоны, которая в свою очередь включает Манитанырдский золоторудный узел. В пределах Манитанырдского золоторудного узла выделено Нияюское рудное поле в составе которого находятся рудопроявления Верхненияюское-1 и Верхненияюское-2 (рис. 1).

Рудопроявление Верхненияюское-1 находится на правом берегу руч. Голубого в 1 км выше его устья. Рудная зона вытягивается узкой полосой в СВ направлении на 1.4 км. На участке развиты туфопесчаники, туфосланцы, альбит-серицитовые сланцы, филлитовидные сланцы и, реже, прослои эффузивов основного состава энганпейской свиты (V<sub>2</sub>–Є<sub>1</sub>en). Широко развиты кварцевые, кварц-карбонатные жилы с цоизитом, асбестом, а также

кварц-арсенопиритовые прожилки. Азимут простирания пород 15–20°, угол падения 60–70°. Рудная минерализация приурочена к зонам интенсивного рассланцевания. Мощность прожилков колеблется от нескольких миллиметров до 10–15 см. Они имеют “кулисообразное” залегание, согласное с вмещающими породами, и образуют зоны протяженностью 2–3 м, редко 8–10 м. Наиболее интенсивная минерализация отмечена на правом берегу руч. Голубого, где мощность зоны достигает 24–26 м, прослеживаясь по окислам ржаво-бурого цвета. Минерализация бедная, однотипная. Рудные минералы представлены пиритом, арсенопиритом, меньше – халькопиритом, сфалеритом. Из гипергенных отмечены ковеллин и лимонит. Нерудные минералы – кварц, хлорит, клиноцоизит.

Наиболее хорошо изученным, до поисково-оценочной стадии, считается рудопроявление Верхненияюское-2, расположенное на левом берегу руч. Безымянного в 2.6 км выше его слияния с руч. Голубым. Рудное поле сложено эффузивами основного состава, их туфами, туфопесча-



- |   |              |    |              |    |           |    |             |    |                   |    |                  |    |           |    |          |
|---|--------------|----|--------------|----|-----------|----|-------------|----|-------------------|----|------------------|----|-----------|----|----------|
| 1 | $Q_{III-IV}$ | 2  | $E_3-O_1mnt$ | 3  | $R_4-Ven$ | 4  | $R_{3-4}bd$ | 5  | $v\beta\pi O_1lk$ | 6  | $\psi E_{2-3}se$ | 7  | $L$       | 8  | $\Gamma$ |
| 9 | $\cup$       | 10 | $\bigcirc$   | 11 | $\times$  | 12 | $\equiv$    | 13 | $a$               | 14 | $a$              | 15 | $\bullet$ | 16 | $a$      |

**Рис. 1.** Геологическая карта участка рудопроявлений Верхняяюское-1 и 2.

1 – верхнечетвертичные отложения: суглинки, супеси с гравием, галькой, пески; 2 – манитаньрдская серия нерасчлененная: конгломераты, гравелиты, кварцитопесчаники, алевролиты, покровы эффузивов контрастной базальт-риолитовой формации; 3 – энганзепейская свита: флишоидное переслаивание глинистых, алевролитистых сланцев, песчаников и кремнистых сланцев, в низах – туфопесчаники, туфоконгломераты, прослои кислых эффузивов, в верхней части – линзы известняков; 4 – бедамельская серия: эффузивы основного, среднего, реже кислого состава, их туфы, линзы известняков, в кровле – горизонт кластолав и лавобрекчий смешанного состава; 5 – леквожский комплекс: габбро, габбро-диабазы, диабазовые порфириды; 6 – сивьягинско-энганзепейский комплекс: серпентиниты апоперидотитовые, апириксенитовые; 7 – базальты; 8 – диабазы; 9 – туфы; 10 – конгломераты, гравелиты; 11 – кварцито-песчаники; 12 – сланцы; 13 – разрывные нарушения: а – достоверные по геологическим данным, б – предполагаемые; 14 – элементы залегания; 15 – золоторудные проявления; 16 – водотоки: а – постоянные, б – временные.

никами, туфоалевролитами, ортосланцами бедмельской серии ( $R_3$ - $V_2$ bd). Залегание пород моноклинальное, азимут простирания  $35$ – $50^\circ$ , угол падения  $60$ – $70^\circ$ . Широко развиты трещиноватость и мелкие разломы. Рудная зона представлена кварцевыми, кварц-карбонатными, кварц-хлоритовыми, кварц-аксинитовыми, кварц-баритовыми и кварц-сульфидными жилами и прожилками, последние – с золоторудной пирит-арсенопиритовой минерализацией. Мощность жил до  $0.2$ – $0.5$  м, рудных прожилков  $4$ – $5$  см. Контакты резкие, вмещающие породы изменены слабо. В зальбандах наблюдаются следы скольжения, внутрирудные прослои рассланцованы, милонитизированы и превращены в глину. Мощность рудных зон изменяется в интервале  $0.15$ – $4.5$  м.

Рудная минерализация представлена пиритом, арсенопиритом, реже – сфалеритом, марказитом, халькопиритом, галенитом, пирротинном, борнитом, халькозином, ковеллином, гетитом, лепидокрокитом, лимонитом. В верхней части рудной зоны сульфиды окислены, наблюдаются охры и ожелезнение пород, кварц выщелочен и имеет губчатый облик. Граница зон окисления на глубине не установлена, но до уровня горизонта подземных выработок распространение гипергенных минералов широкое (максимальная глубина штольни  $18$  м). На глубину и по простиранию на северо-восток происходит выклинивание рудных зон, на юго-западе выклинивание не установлено. Запасы золота на рудопроявлении Верхненаяюское-2 позволяют квалифицировать его как мелкое месторождение.

Все золотопроявления характеризуются однотипным оруденением, тяготеющим к единой зоне разломов северо-восточного простирания протяженностью порядка  $16$  км и шириной  $1$ – $2$  км. Зоны изменений протягиваются во вмещающих породах согласно общему направлению стратиграфических подразделений и даек основного и среднего состава. Рудные зоны представляют собой линейно вытянутые участки рассланцованных пироксенофировых лавобрекчий, в которых сосредоточены чаще всего жилы и прожилки кварц-сульфидного, кварцевого и кварц-хлоритового состава. Во вмещающих породах оруденение бедное и представлено тонкой вкрапленностью сульфидов по сланцеватости. В рудных зонах распространены две основные группы жильных образований: 1) *кварц-сульфидные и сульфидные жилы и прожилки с золотом, связанным с сульфидной минерализацией*; 2) *кварцевые, кварц-хлоритовые, кварц-карбонатные, кварц-баритовые, кварц-аксинитовые, кварц-эпидотовые безрудные жилы и прожилки*.

Взаимоотношения указанных разновидностей жил не совсем ясны. Жильные образования обычно ориентированы по сланцеватости пород, но иногда полого ее пересекают в пределах рудных зон.

Они катаклазированы и часто превращены в брекчию, что объясняется пострудными подвижками вдоль трещин. Относительно более мощные жилы подверглись катаклазу в меньшей степени, маломощные разрушены почти нацело. В приповерхностных частях рудных зон широко развиты явления гипергенеза и выщелачивания.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Валовый состав газов включений был проанализирован на газовом хроматографе “Цвет 800” с приставкой для термического вскрытия включений. Для анализа использовались навески кварца массой  $0.5$  г, фракции  $0.25$ – $0.5$  мм. Декрепитация включений производилась при температуре  $1000^\circ\text{C}$ . Пиролиз образцов проводился в реакторе в атмосфере гелия. Чувствительность метода по основным компонентам составила (мкл):  $2 \times 10^{-2}$  для  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$ ,  $3 \times 10^{-2}$  для  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ,  $3 \times 10^{-3}$  для  $\text{H}_2\text{O}$ .

Газовый состав индивидуальных включений изучался методом Романовской спектроскопии (КР). Наблюдения были проведены на Рамановском спектрометре U-1000 с лазером **Millennia Pro** в Институте геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск.

Гомогенизация и криометрия включений проводилась частично в термо-криокамере Linkam TH 600 в Институте геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Частично гомогенизация включений проводилась на серийной установке УМТК-3 в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, с использованием хромель-алюмелевой термопары, которая градуировалась по таким реперным веществам, как самородная сера, янтарная кислота и бихромат калия. Показания снимались с цифрового вольтметра В7-34. Погрешность измерений составила  $3$ – $4^\circ\text{C}$ . Часть включений изучалась методом криометрии в самодельной камере с хромель-копелеевой термопарой, которая градуировалась по растворам  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ , показания снимались с цифрового вольтметра. Погрешность установки составила около  $1^\circ\text{C}$ . Расчет интервалов температур гомогенизации при статистической обработке результатов проводился по формуле Стреджарса, модифицированной Ю.А. Ткачевым [11].

Соленость растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда. Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы [2]. Давление минералообразующей среды рассчитано по диаграмме фазового равновесия  $\text{NaCl}$ – $\text{H}_2\text{O}$  [10]. Поправка на давление определялась по диаграмме поправок  $\Delta T$  к температуре гомогенизации на давление [13]. Установлено, что при таких давлениях и концентрациях поправка очень незначительная, не более  $10$ – $15^\circ\text{C}$ , поэтому будем условно считать, что  $T_{\text{гом}} = T_{\text{обр}}$ .

Изотопные исследования воды и  $\text{CO}_2$  ГЖВ выполнены на масс-спектрометре МИ-1201М в лабо-



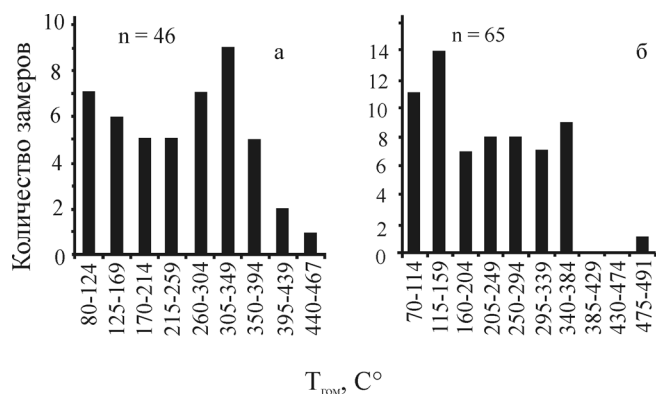


Рис. 2. Гистограмма зависимости распределения температур гомогенизации от частоты встречаемости: а – для золоторудного кварца; б – для незолоторудного кварца.

ратории изотопных и ядерно-физических методов ВСЕГИНГЕО МПР. При изучении изотопного состава кислорода и водорода воды использовался стандарт V-SMOW, для углерода и кислорода  $\text{CO}_2$  – внутрилабораторный стандарт кальцита с приведением полученных результатов к международному стандарту PDB. Изотопный состав кислорода воды ГЖВ определялся методом расчета по кислороду  $\text{CO}_2$ , уравновешенного с водой включений при 25°C. Перед вскрытием включений навеска в течение часа прогревалась при 60°C при постоянном вакууммировании образца. Вскрытие включений проводилось термическим способом, нагревом образца до  $t = 400\text{--}450^\circ\text{C}$  в кварцевом реакторе с одновременным сбором извлеченных воды и газов в высоковакууммированный сосуд, постоянно охлаждаемый жидким азотом. Разделение воды и углекислого газа и очистка  $\text{CO}_2$  от примесей других газов проводились последовательным вымораживанием и сбором фракций с помощью жидкого азота и криогенных жидкостей (смесь жидкого азота с ацетоном и спиртом). Для исключения эффекта изотопного фракционирования между фракциями при высоких температурах (температуре вскрытия включений) и для изотопного уравнивания по кислороду воды и углекислого газа при нормальной температуре перед разделением  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  сосуды с отобранными водой и газом в течение двух суток выдерживались в термостате при 25°C. Водород из воды получался редукцией воды на горячем цинке. Для анализа капилляр с каплей воды помещался в ампулу из молибденового стекла, куда добавлялось необходимое количество особо чистого цинка и для активации реакции – бромид свинца. После замораживания и вакууммирования ампула запаивалась и помещалась в муфельную печь, где при её нагреве до 410°C проводилась редукция воды. На масс-спектрометре ампула с водородом вскрывалась в вакуумном ампулоломателе. Ошибка измерений не

превышала:  $\pm 0.2\text{‰}$  для кислорода,  $\pm 2\text{‰}$  для водорода и  $\pm 0.1\text{‰}$  для углерода.

Изучение изотопного состава углерода и кислорода кальцита из кварцевых жил проведены в группе изотопной геохимии Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Измерение проводилось в режиме непрерывного потока на аналитическом комплексе, включающем в себя масс-спектрометр DELTA-V Advantage с системой подготовки и ввода проб Gas Bench II. Ошибка определения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в кальците не превышала  $\pm 0.02\text{‰}$  для углерода и  $\pm 0.05\text{‰}$  для кислорода.

Рентгендифрактометрические исследования образцов кальцита были выполнены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (излучение – CuK, Ni фильтр, 40 кВ, 30 мА). Параметры элементарной ячейки определялись с использованием внутреннего стандарта (Ge). Расчет параметров элементарной ячейки проводился по программе UNITCELL.

Содержание органического углерода в породе определялось при помощи “экспресс-анализатора на углерод АН-7529” при предварительном получении нерастворимого в концентрированной соляной кислоте остатке породы (НОП). В качестве стандарта использовалась глюкоза. Данные по  $C_{\text{орг}}$ , полученные при анализе, пересчитывались на исходную породу.

#### ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения условий минералообразования нами изучены газовой-жидкие включения в таких прозрачных минералах, как кварц, кальцит, эпидот, аксинит, входящих в состав золоторудных и незолоторудных кварцевых жил.

**Кварц.** На территории района встречается кварц трех генераций: мелкозернистый серый кварц, гигантозернистый белый полупрозрачный кварц и кристаллы горного хрусталя. Нами изучены две последние генерации. В процессе работы были детально изучены флюидные включения в золоторудном кварце. Для сравнения приведены данные изучения незолоторудного кварца, отобранного не только на Верхнеиняуском участке, но и на сопредельных территориях. Проведенные исследования не выявили существенных различий между газовой-жидкими включениями в золоторудном и незолоторудном кварце. Температура гомогенизации сингенетичных включений в этих кварцевых жилах приблизительно одинаковая (рис. 2). Основная масса включений переходит в гомогенное состояние до 400°C. Более высокотемпературные включения встречаются очень редко, что отчетливо видно при статистической обработке. Вызывают сомнения включения, имеющие температуру гомогенизации выше 400°C. В то же время они присутствуют в кварце, и фазовые переходы в них отчетливо

**Таблица 1.** Результаты термобарогеохимических исследований

| Минерал                    | $T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$ | $\text{NaCl}_{\text{экв}}, \text{ вес. \%}$ | $T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$  | Предполагаемые водно-солевые системы                                     | Давление, $\text{кг/см}^2$ |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Золоторудный кварц         | <u>85–394</u><br>65              | <u>0–17</u><br>17                           | $\sim -23$ (10)<br>$\sim -35$ (1) | $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$<br>$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ | 1–250                      |
| Незолоторудный кварц       | <u>70–384</u><br>35              | <u>4.0–16.5</u><br>25                       | $\sim -23$ (16)<br>$\sim -35$ (2) | $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$<br>$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ | 1–250                      |
| Кристаллы горного хрусталя | <u>135–358</u><br>11             | <u>0–2</u><br>3                             | $\sim -23$ (3)                    | $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$                                            | –                          |
| Кальцит                    | <u>80–287</u><br>12              | <u>~15</u><br>1                             | $\sim -35$ (1)                    | $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$                                  | 1–10                       |
| Эпидот                     | <u>124–217</u><br>20             | <u>6–11</u><br>3                            | $\sim -35$ (3)                    | $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$                                  | 1–3                        |
| Аксинит                    | <u>101–126</u><br>4              | –                                           | –                                 | –                                                                        | $\sim 1$                   |

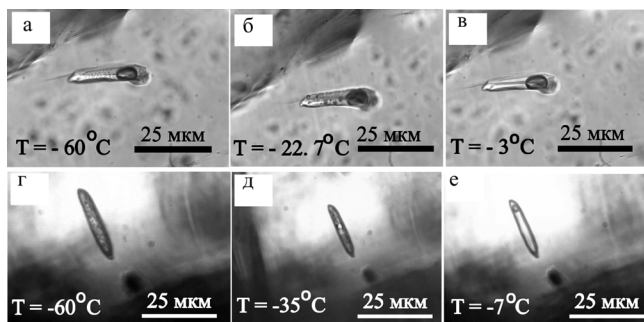
Примечание.  $T_{\text{гом}}$ : в числителе – интервалы измерений, в знаменателе – число замеров;  $T_{\text{эвт}}$ : в скобках – число замеров.

наблюдаются. Вероятно, образование этих включений связано с процессами расщуривания, которые обычно наблюдаются в кварце и описаны в литературе [8]. Данные по таким включениям в наших выводах не были использованы (предельные температуры гомогенизации, которые реально использованы в наших рассуждениях определены статистически по рис. 2). Практически всегда гомогенизация включений проходила по первому типу (в жидкую фазу), в одном случае наблюдалась гомогенизация включения по второму типу (в газ). Наиболее характерными для золоторудного и незолоторудного кварца являются однофазовые водные включения. Они встречаются более чем в 90% случаев. Двухфазовые включения встречаются значительно реже. Обычно содержание газовой фазы в них не превышает 5 об. %. Редко встречаются включения с газовой фазой  $\geq 70$  об. %. Температура гомогенизации и расчетное давление минералообразующей среды для золоторудного и незолоторудного кварца практически не отличаются друг от друга (табл. 1). Включения в кристаллах горного хрусталя характеризуются пониженными температурами и давлением минералообразующей среды. Стоит отметить, что включения в жильном кварце с большим содержанием газовой фазы, как правило, очень мелкие. Их размер обычно не превышает 10 мкм и в среднем составляет 5–6 мкм. Для таких включений характерны более высокие температуры гомогенизации и повышенная соленость. Кроме того, в данном кварце часто встречаются двух-, трехфазовые включения, содержащие твердую фазу. Обычно она представлена обломками минерала-хозяина, которые были законсервированы при минералообразовании и никак не реагируют на нагревание образца. В единичных случаях наблюдались включения, содержащие твердую фазу, которая при нагревании до 500–550°C также не растворялась, но наблюдалось ее некоторое “оплавление”. Это явление часто характерно для органического вещества. Жильный кварц не был про-

анализирован на наличие органики, но во вмещающих породах содержание  $C_{\text{орг}}$  равно приблизительно 0.03 мас. % (устное сообщение Я.Э. Юдовича).

При замораживании включений (рис. 3а, б, в) было установлено, что во включениях золоторудного кварца содержатся водные растворы солей с температурой плавления эвтектики около  $-23$  и  $-35^\circ\text{C}$ , что соответствует таким солевым системам, как  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$  и  $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  (табл. 1), причем вторая система встречается крайне редко (все-го в 1 замере). Концентрация солей в пересчете на  $\text{NaCl}$ -эквивалент варьирует в пределах 2–17 вес. %. Растворы включений незолоторудного кварца имеют температуры плавления эвтектики, равные  $-23$  и  $-35^\circ\text{C}$ , что соответствует солевым системам  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$  и  $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Как и в предыдущем случае, включения с температурой плавления эвтектики равной  $-35^\circ\text{C}$  встречаются редко (2 замера). Концентрация солей в пересчете на  $\text{NaCl}$  равна 0–16.5 вес. %. Включения в кристаллах горного хрусталя содержат растворы с температурой плавления эвтектики  $-23^\circ\text{C}$ , что может соответствовать солевой системе  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ . По литературным данным известно, что в кварце, генетически связанным с золоторудной минерализацией, часто встречаются включения, содержащие жидкую углекислоту [6, 9]. Жидкая углекислота очень хорошо диагностируется при замораживании включений. Нами в процессе работы было проведено множество таких экспериментов. Включения с жидкой углекислотой обнаружены не были.

*Кальцит.* Для кальцита наиболее характерны двухфазовые включения с объемом газовой фазы  $\leq 5$  об. %. Температура гомогенизации и расчетное давление минералообразующей среды отличаются меньшими значениями, чем в кварце. При замораживании включений было установлено, что температура плавления эвтектики равна  $-35^\circ\text{C}$ , что соответствует такой солевой системе как  $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Концентрация солей в пересчете



**Рис. 3.** Криометрические исследования: а, б, в – для газовой-жидких включений в кварце, г, д, е – для газовой-жидких включений в эпидоте.

на NaCl ~15 вес. %. При изучении образцов кальцита нами были установлены повышенные содержания стронция в некоторых образцах (табл. 2). По данным рентгеноструктурного анализа стронций не образует самостоятельной фазы, а входит в структуру кальцита, замещая кальций. Общая дифракционная картина кальцита при этом не меняется. Вхождение в структуру кальцита атомов стронция, больших по размеру, нежели атомы кальция, приводит к закономерному уменьшению параметров кристаллической решетки минерала. Особенно чутко реагируют на присутствие стронция параметры элементарной ячейки  $c$  и  $V$ . Можно предположить, что влияние на параметры элементарной ячейки оказывают и другие примеси, однако, либо их содержание относительно невелико, либо они, как например марганец и железо, проявляют ту же тенденцию, что и стронций.

**Эпидот.** Для эпидота наиболее характерны однофазовые включения, реже встречаются включения с содержанием газовой фазы  $\leq 5$  об. %. Температура гомогенизации и расчетное давление минералообразующей среды отличаются меньшими значениями, чем в кварце и кальците. Это связано с тем, что эпидот является наиболее поздним из всех изученных нами минералов. Он был сформирован на заключительном этапе минералообразования, для которого характерны пониженные температуры и давления. При замораживании включений (рис. 3г, д, е) было установлено, что температура плавления эвтектики равна  $-35^\circ\text{C}$ , что может соответствовать такой солевой системе как  $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Концентрация солей в пересчете на NaCl равна 6–11 вес. %.

**Аксинит.** Этот минерал характеризуется наиболее низкими температурами гомогенизации включений. Но по времени образования он является более ранним, чем все исследованные нами минералы. Возрастные взаимоотношения отчетливо устанавливаются по пересечению аксинита прожилками кварц-кальцит-эпидотового состава. По нашему мнению он является наиболее древним жильным минералом и связан с внедрением даек долеритов

леквожского комплекса раннеордовикского возраста. В связи с тем, что включения в аксините очень малы, а пластинки почти не прозрачны, мы не смогли провести более детальное исследование газовой-жидких включений.

### ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО СОСТАВА МЕТОДАМИ ХРОМАТОГРАФИИ И КР

Важнейшим компонентом минералообразующих систем являются газы. Их состав, соотношения с водой зависят от температурного режима минералообразования, литологического состава вмещающих пород, гипсометрического уровня рудного тела и других факторов. Многие авторы [1, 3] указывают на возрастание газонасыщенности флюидных растворов на глубине и увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в составе газовой-жидких включений в золоторудном кварце и самородном золоте. В целом, газовый состав золоторудного флюида достаточно прост и является в основном азотно-углекислым. Такие газы, как метан и окись углерода, содержатся в незначительных количествах. Обычно наблюдается заметное увеличение содержания азота по мере приближения к поверхности рудных тел, которое, возможно, говорит об участии в формировании руды инфильтрационных вод глубинной циркуляции [4]. Повышение содержаний  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  при незначительных содержаниях азота свидетельствует об относительно глубинном происхождении минералообразующих растворов. В то же время, соотношение  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  также существенно отличается на разных гипсометрических уровнях. Наблюдается тенденция его уменьшения с глубиной. Это отношение также характеризует окислительно-восстановительный потенциал флюида [5]. С уменьшением глубины наблюдается увеличение содержания  $\text{H}_2\text{O}$  во включениях, что свидетельствует об активном участии инфильтрационных вод в гидротермальном процессе. Изменение соотношения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  наблюдается и при переходе непродуктивных минеральных ассоциаций к продуктивным. Наиболее высокие значения соотношения  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  характерны для продуктивных стадий.

Нами методом газовой хроматографии был изучен валовый состав газов во флюидных включениях (табл. 3). В результате изучения установлено, что включения в золоторудном и незолоторудном кварце преимущественно водные, как это уже было отмечено при визуальном наблюдении (рис. 4). Соотношение  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  для золоторудного кварца – 0.004, для незолоторудного – 0.009, что абсолютно не характерно для кварца, генетически связанного с золоторудной минерализацией. Например, для кварца рудопроявления Синильга, которое находится на Приполярном Урале и генетически связано с золоторудной минерализацией, это соотношение в среднем равно 1.43. Кроме того, для

**Таблица 2.** Параметры элементарной ячейки в кальците и содержание Sr, Mn, Fe.

| № пробы | a, Å  | c, Å   | V, Å    | Sr, г/т | Mn, г/т | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ, г/т |
|---------|-------|--------|---------|---------|---------|-----------------------------------------|
| СН-1    | 5.009 | 17.177 | 373.188 | 400     | 2100    | 1700                                    |
| СН-50   | 4.994 | 17.092 | 369.171 | 1200    | 8900    | 10100                                   |
| СН-99   | 4.997 | 17.233 | 372.670 | 370     | 1500    | 500                                     |
| СН-14   | 5.001 | 17.106 | 370.540 | 1300    | 3200    | 1700                                    |

**Таблица 3.** Состав газов (мкг/г) во включениях

| Тип жил, (кол-во замеров) | H                        | N <sub>2</sub>           | CO                       | CH <sub>4</sub>          | CO <sub>2</sub>          | H <sub>2</sub> O                 | Σ                                |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Незолоторудные (20)       | <u>0.00–0.22</u><br>0.03 | <u>0.00–0.51</u><br>0.17 | <u>0.00–1.21</u><br>0.18 | <u>0.06–0.60</u><br>0.21 | <u>0.70–9.16</u><br>2.82 | <u>11.60–1508.42</u><br>304.80   | <u>12.74–1518.17</u><br>308.24   |
| Золоторудные (6)          | <u>0.00–0.39</u><br>0.18 | <u>0.00–1.49</u><br>0.44 | <u>0.33–0.75</u><br>0.56 | <u>0.12–0.65</u><br>0.37 | <u>3.37–12.9</u><br>6.65 | <u>600.00–2762.00</u><br>1627.00 | <u>606.36–2766.67</u><br>1411.70 |

Примечание. В числителе – интервал значений, в знаменателе – среднее, в скобках – число замеров.

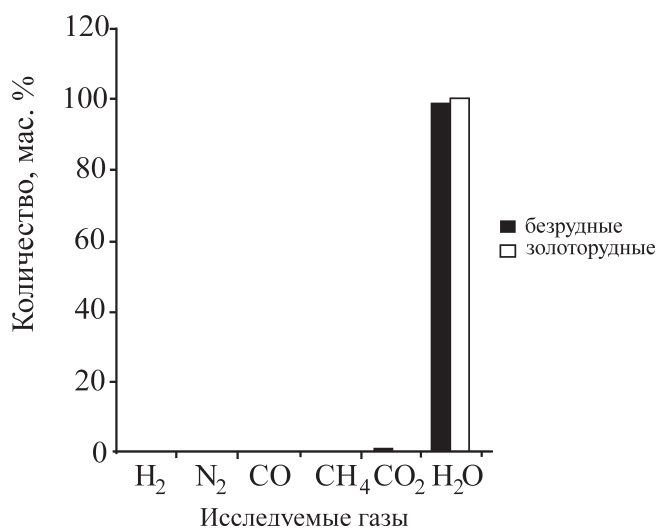
кварцево-золоторудной минерализации обычно характерно повышенное содержание азота. Например, в золоторудном кварце Синильги это содержание в среднем составляет 6.1 мас. %. В золоторудном кварце изученных объектов содержание азота в среднем составляет 0.03 мас. %, в незолоторудном – 0.05. Золоторудный кварц других уральских месторождений, как правило, отличается повышенной флюидонасыщенностью. Стоит отметить, что золоторудный кварц на данной территории по сравнению с незолоторудным тоже отличается повышенной флюидонасыщенностью, которая равна в среднем 1412 мкг/г (для незолоторудного – 308 мкг/г). Но это никак не может быть связано с процессом отложения золота, т.к. вызвано повышенным содержанием воды во включениях. Это явление можно объяснить тем, что формирование кварцевых жил происходило по сильно трещиноватым породам. В результате резкого перепада давления и температур, связанного с трещиноватостью, происходил захват большого количества включений. Таким образом, могли захватываться сингенетичные преимущественно водные включения. Кроме того, в данном кварце наблюдается большое количество эпигенетичных включений. Их формирование, вероятно, тоже связано с тем, что рудные тела приурочены к интенсивно катаклазированным зонам. Повышенное количество включений может быть связано именно с процессами залечивания трещин, образовавшихся в результате тектонических подвижек.

Известно, что в кварце, генетически связанном с золоторудной минерализацией, часто встречаются однофазовые включения, которые содержат в себе газ. Особенно часто в таких включениях встречается углекислый газ. Реже наблюдается метан и азот. В процессе визуального наблюдения нами были выделены несколько однофазовых включений в золоторудном и незолоторудном кварце изученных рудопроявлений, которые похожи на газовые включения. Они были изучены методом КР. Про-

веденные исследования установили, что этих газов во включениях нет, все они оказались пустыми (вскрытыми).

### ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Очевидно, что кроме *PT* условий, определяющими факторами в формировании гидротермальных месторождений являются источник, состав и объём флюидов, участвующих в гидротермальном процессе. Данные по изотопному составу химических элементов в минералах и отдельных элементов в гидротермальных растворах давно используются при определении источника вещества и для изучения условий формирования минеральных образований. Изотопный состав участвующих в гидротермальных процессах жидкой и газовой фаз может быть установлен двумя способами: прямым определением состава воды и газов, отобранных из газовой

**Рис. 4.** Относительное содержание газов во включениях.



**Таблица 4.** Результаты изотопных масс-спектрометрических исследований водной и газовой фаз газожидких включений из нерудного кварца

| № пробы | Изотопный состав, ‰                     |                                      |                                         |                                        |
|---------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
|         | $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)^{**}$ | $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)^*$ | $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)^{**}$ | $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O})^*$ |
| 545     | нет $\text{CO}_2$                       |                                      |                                         | –92                                    |
| 550     | –4.3                                    | +10.0                                | –20.5                                   | –106                                   |
| 533     | –4.2                                    | +10.1                                | –20.4                                   | –105                                   |
| 531     | –4.2                                    | +10.2                                | –20.3                                   | –102                                   |

Примечание. \* – относительно SMOW, \*\* – относительно PDB.

жидких включений, и расчетным определением их характеристик по изотопному составу элементов из минералов, сформировавшихся при гидротермальной деятельности. При этом делается допущение, что в течение гидротермального процесса при наблюдаемых температурах существовало изотопное равновесие между химическими элементами рудообразующего раствора и теми же элементами в образующемся минерале. Поскольку для растворов и газов равновесие достигается очень быстро (за часы и даже минуты), а теоретически возможные изотопные эффекты, связанные с кинетикой процесса, весьма незначительны, то допущение об изотопном равновесии в гидротермальных системах вполне обосновано.

Для определения условий формирования жильных образований на рудопоявлении Верхнеиняуское-1 и месторождении Верхнеиняуское-2 нами был изучен изотопный состав кислорода и водорода воды и кислорода и углерода углекислого газа флюидных включений в безрудном жильном кварце, а также кислорода и углерода кальцита, выполняющего гнезда в кварцевых жилах. Целью исследований являлось выявление этапов гидротермальной деятельности на площади изучаемых месторождений, установление источника вещества для различных жильных образований, а также определение изменчивости условий в период этапов и отдельных стадий гидротермального процесса. Результаты исследований приведены в табл. 4 и 5.

Изотопные данные по водной и газовой фазам флюидных включений для всех образцов кварца показывают практически идентичные значения (табл. 4) и, очевидно, характеризуют один этап гидротермальной деятельности. Чрезвычайная выдержанность изотопного состава флюидов для разных образцов кварца говорит о едином и стабильном источнике поступления углекислоты на всех стадиях формирования кварцевых жил. Данные по изотопному составу углерода изученных образцов кальцита (табл. 5), повидимому, отражают изменчивость температурных условий на отдельных стадиях формирования этого минерала. В то же время изотопные характеристики кислорода изученных кальцитов также свидетельствуют об одном этапе образования кальцитовых гнезд. Исследование

углерода различных жильных образований площади показало, что изотопный состав углерода углекислоты, сопутствующей образованию кварца и кальцита, характеризовался резким отличием, при этом участвующий в гидротермальной деятельности углекислый газ принадлежал генетически различным источникам: мантийному и биогенному, коровому. Совместное рассмотрение изотопных данных по углероду и кислороду кальцита и различных фаз флюидных включений в кварце свидетельствует, что становление кварцевых жил и формирование гнезд кальцита в них при разнице источников, очевидно, были разнесены и во времени. Таким образом, сами минеральные образования указывают на самостоятельные этапы гидротермальной деятельности, а их изотопный состав характеризует как этапы в целом, так и отдельные стадии минералообразующих процессов на данной площади.

#### Флюидные включения в кварце

**Углерод.** Однородность значений  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  в ГЖВ кварца (табл. 4) говорит об одном этапе формирования включений, содержащих углекислый газ, и едином источнике его углерода. Согласно литературным данным [7, 12], значения  $\delta^{13}\text{C} = -4\text{‰}$ , PDB соответствуют изотопному составу углерода карбонатитов ( $\delta^{13}\text{C} = -(2-8)\text{‰}$ , PDB), углерода углекислого газа геотермальных областей ( $\delta^{13}\text{C} = -(2-6)\text{‰}$ , PDB) и близки к изотопному составу углерода большинства алмазов ( $\delta^{13}\text{C} = -(3-7)\text{‰}$ , PDB), т.е. указывают на глубинный (мантийный) источник поступления углекислоты. Некоторую неопределенность в установлении источника углекислоты по изотопии углерода вносит отсутствие данных по бикарбонат-иону в ГЖВ кварца. В случае присутствия последнего в жидкой фазе включений и значительной его концентрации, совокупный изотопный состав углерода системы для установленных температур может характеризоваться диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  от +3 до  $-4\text{‰}$ . В изученных нами кварцах самостоятельной фазы карбонатов во включениях не установлено, и, согласно термобарогеохимическим исследованиям, концентрация бикарбонат-иона здесь также не может быть значительной. Поскольку других углеродсодержащих фаз ни в жидкой, ни в газовой составляющей флюидных включений в изученных нами образцах также не установлено, можно с достаточной долей уверенности утверждать, что изотопный состав углерода  $\text{CO}_2$  в кварце отражает состав углерода первоисточника этого элемента. Таким образом, изотопный состав углерода углекислого газа из флюидных включений в кварце очевидно указывает на глубинный источник поступления углекислоты при формировании кварцевых жил.

**Кислород и водород.** Очевидно, что на изотопный состав кислородсодержащих фаз гидротер-



**Таблица 5.** Результаты карбонатного анализа и изотопных масс-спектрометрических исследований  $^{13}\text{C}$  и  $^{18}\text{O}$  в кальците

| № пробы | Химический состав, мас. % |              |              |              |              |                        |                                    |                      |          | Изотопный состав, ‰         |                              |
|---------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
|         | $\text{CO}_2$             | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{MnO}$ | $\text{FeO}$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{F}_2\text{O}_{\text{зобц}}$ | $\text{H}_2\text{O}$ | $\Sigma$ | $\delta^{13}\text{C}$ , PDB | $\delta^{18}\text{O}$ , SMOW |
| CH 1    | 42.78                     | 54.7         | <0.5         | 0.21         | <0.25        | <0.005                 | 0.17                               | 0.58                 | 98.44    | –15.8                       | +11.5                        |
| CH 14   | 43.26                     | 54.4         | <0.5         | 0.32         | <0.25        | <0.005                 | 0.17                               | 0.64                 | 98.76    | –13.0                       | +11.4                        |
| CH 50   | 37.88                     | 47.8         | n/o          | 0.89         | 0.77         | 0.014                  | 1.01                               | 10.74                | 98.28    | –11.0                       | +12.2                        |
| CH 99   | 42.69                     | 54.0         | <0.5         | 0.15         | <0.25        | <0.005                 | 0.05                               | 3.74                 | 99.82    | –10.9                       | +11.8                        |

мальных флюидов самое существенное влияние должен оказывать состав воды растворов. В качестве потенциальных источников сингенетических с рудообразующими растворами вод могут рассматриваться мантийные (“ювенильные”), глубинные захороненные, формационные (воды дегидратации водо- и гидроксилсодержащих минералов), а также инфильтрационные воды метеогенного происхождения. В отличие от химического состава, при определении генезиса гидротермальных растворов изотопный состав кислорода и водорода вод является наиболее достоверным показателем их источника.

Учитывая, что изотопный состав кислорода “ювенильной” воды сегодня никем достоверно не установлен, большинством исследователей [12, 14 и др.] условно принимается, что изотопный состав кислорода и водорода мантийной воды соответствует значениям  $\delta^{18}\text{O} = +(6-8)\text{‰}$ , SMOW,  $\delta\text{D} = -(50-80)\text{‰}$ , SMOW, а метаморфической –  $+(5-25)\text{‰}$  и  $-(20-65)\text{‰}$ , соответственно. По нашему мнению, при гидротермальной деятельности в магматических системах и при метаморфических процессах фиксируется преимущественно эффект высокотемпературного изотопного обмена кислорода гидротермальных растворов, представленного метеогенной, либо морской водой, с вмещающими породами, изотопный состав кислорода которых составляет диапазон от  $-35$  до  $+35\text{‰}$ , SMOW, и в подавляющем числе случаев характеризуемый значениями  $\delta^{18}\text{O} > +6\text{‰}$ , SMOW.

При наличии во включениях  $\text{CO}_2$  и при известной температуре гидротермального процесса, значения  $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$  флюидов поддаются расчету. Обязательным условием здесь является превышение по массе количества воды ГЖВ над количеством углекислоты. Поскольку в нашем случае в образцах кварца включений с жидкой углекислотой обнаружено не было (это установлено при визуальном наблюдении и подтверждено методом газовой хроматографии), можно считать, что количество воды во включениях по массе превышает количество углекислого газа. Исходя из принципа баланса вещества и на основании известных коэффициентов изотопного фракционирования в системе  $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$  [12, 14], кислород углекислого газа должен находиться в изотопном равновесии с водной фазой и отражать изотопный состав кислорода воды флюидных включений. Температура формирования включе-

ний в кварце, содержащих углекислый газ, соответствует  $70\text{--}394^\circ\text{C}$  [13]. Расчеты показывают, что при данных температурах кислород воды минералообразующих растворов имел значения  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-27\text{‰}$  (при  $70^\circ\text{C}$ ) до  $0\text{‰}$ , SMOW (при  $390^\circ\text{C}$ ). Значения, близкие к  $0\text{‰}$ , SMOW, могут указывать на воду, по изотопному составу аналогичную метеогенной воде низких (приэкваториальных) широт, либо воду морского генезиса. Значения  $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ , близкие к  $0\text{‰}$ , SMOW, также могут характеризовать высокотемпературные растворы, представленных изотопно легкой метеогенной водой, при поступлении которой происходил обмен по кислороду между растворами и вмещающими породами. На участие метеогенной воды в формировании изученного нами кварца определенно указывают и полученные здесь низкие значения изотопного состава водорода воды из флюидных включений ( $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O}) = -(92-106)\text{‰}$ , SMOW (табл. 4), не соответствующие ни гипотетической “ювенильной”, ни “метаморфической” воде, а прямо указывающие на инфильтрационную воду суши. Таким образом, очевидно, что при формировании как безрудного, так и золоторудного кварца преобладала изотопно-легкая инфильтрационная вода метеогенного происхождения.

#### Изотопный состав кальцитов

**Углерод.** Значения  $\delta^{13}\text{C}$  кальцита, выполняющего гнезда в кварцевых жилах, при большом разбросе значений ( $\delta^{13}\text{C} = -(10.9-15.8)\text{‰}$ , PDB) характеризуются близкими значениями между отдельными образцами. Полученные по углероду кальцитов данные не соответствуют ни морским ( $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ , PDB), ни пресноводным карбонатам ( $\delta^{13}\text{C} > -8\text{‰}$ , PDB) и далеки от значений изотопного состава углерода мантийного происхождения ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $-8\text{‰}$ , PDB). Если, в качестве гипотезы, рассматривать разницу в изотопном составе углерода кальцитов как результат эволюции изотопного состава флюида, то такое рассмотрение возможно при условии, что все изученные кальциты формировались при одной или близкой температуре, что противоречит имеющимся термобарическим наблюдениям. Таким образом, изменчивость изотопного состава углерода кальцитов отражает не эволюцию изотопного состава флюидов, а изменчивость *PT*-условий при формировании кальцита и, как следствие, изменчивость состава растворов и коэф-

фициентов фракционирования в системе: графит– $\text{CO}_{2(\text{газ})}$ – $\text{CO}_{2(\text{вод})}$ – $\text{HCO}_3^-$ –кальцит на разных стадиях формирования кальцитовых гнезд.

Условно объяснением полученных характеристик  $\delta^{13}\text{C}$  кальцита может быть смешение при гидротермальной деятельности углерода различных источников. Согласно данным [12], изотопный состав углерода, равновесного с кальцитом углекислого газа в диапазоне температур 80–300°C должен иметь значения  $\delta^{13}\text{C}$  от –(18–23) до –(9.5–14.5)‰, PDB. При исключении из состава гидротермального раствора, из которого формировался кальцит, значений  $\delta^{13}\text{C}$ , характерных для глубинного углерода, величина  $\delta^{13}\text{C}$  равновесного с кальцитом  $\text{CO}_2$  будет еще ниже. Таким образом, следует признать, что в любом случае в составе растворов этого этапа гидротермальной деятельности присутствовал (и преобладал) углерод биогенного происхождения, источником которого могло быть рассеянное метаморфизованное органическое вещество из вмещающих толщ (графит). Из приведенных данных можно заключить, что для изученных жильных образований, развитых на рассматриваемой территории, источник поступления углекислоты на разных этапах гидротермальной деятельности был различен. По всей видимости, исследованный нами кальцит формировался на позднем этапе гидротермальной деятельности, первым и локальным проявлением которой явилось формирование кварцевых жил, содержащих включения с глубинным углеродом.

**Кислород.** Изотопный состав кислорода кальцитов характеризуется очень близкими значениями для различных образцов (табл. 5), что свидетельствует об одном этапе образования кальцитовых гнезд и, во всяком случае, о стабильном и едином источнике воды на протяжении всего периода формирования кальцита. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  изученных кальцитов ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ср.}} = +11.7\text{‰}$ , SMOW) не соответствуют ни пресноводным ( $\delta^{18}\text{O} = +(20\text{--}25)\text{‰}$ , SMOW), ни морским ( $\delta^{18}\text{O} = +(25\text{--}30)\text{‰}$ , SMOW) карбонатам. Очевидно, что изотопный состав кислорода кальцитов определялся кислородом воды гидротермальных растворов. Согласно коэффициентам равновесного фракционирования для системы  $\text{CaCO}_3\text{--H}_2\text{O}$  [12, 14], рассчитанные значения кислорода воды, из которой формировался кальцит, при установленном для гидротермальных растворов диапазоне температур 80–300°C дают значения  $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$  от –7.5 до +8, что также указывает на метеогенную воду, испытывающую значительный обмен по кислороду с вмещающими породами при высоких температурах гидротермального раствора.

Совместное рассмотрение изотопных данных по углероду и кислороду кальцита и различных фаз флюидных включений в кварце говорит, что становление кварцевых жил и формирование гнезд кальцита характеризуются не только разницей источников вещества, но и принадлежностью к раз-

личным этапам гидротермальной деятельности на изученной площади. При едином источнике вещества, либо одновременном поступлении углекислоты из различных источников, произошло бы смешение флюида и, соответственно, гомогенизация изотопного состава  $\text{CO}_2$  различных источников. В этом случае углерод углекислого газа, углерод растворенных в воде углеродсодержащих фаз и углерод формирующихся карбонатов должны показывать геохимическое равновесие. При допущении общего этапа формирования кварца и кальцита, температурный режим гидротермального процесса будет соответствовать диапазону температур, установленных для кальцита: 80–300°C. Согласно равновесным коэффициентам разделения в системе  $\text{CO}_2\text{--CaCO}_3$  для этих температур [12], максимальное различие ( $\Delta$ ) в изотопном составе углерода кальцита и углерода  $\text{CO}_2$  должно составлять от 1.5 (при 300°C) до 7‰ (при 80°C), PDB. При этом в условиях невысоких температур, кальцит должен быть обогащен, а при высоких – обеднен изотопом  $^{13}\text{C}$  относительно углерода равновесного с ним углекислого газа, т.е. при крайних значениях зафиксированных здесь температур должен характеризоваться значениями  $\delta^{13}\text{C}(\text{CaCO}_3) = +3$  и  $-6\text{‰}$ , PDB. В изученных нами фазах эти отношения не только не выдерживаются, но и наблюдаются прямо противоположные: установленные величины  $\delta^{13}\text{C}$  кальцита показывают значения  $\delta^{13}\text{C}(\text{CaCO}_3) = -(10\text{--}16)\text{‰}$ , PDB, при этом изотопный состав углерода кальцита легче состава углерода углекислого газа ( $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2) = -4.2\text{‰}$ , PDB. Таким образом, имеющиеся данные показывают, что формирование кварцевых и кальцитовых жил проходило в разное время.

Данные по изотопному составу кислорода также свидетельствуют о двух самостоятельных этапах гидротермальной деятельности. На первый взгляд, близкие значения по кислороду кальцитов и кислороду  $\text{CO}_2$  из включений в кварце говорят о возможной приуроченности формирования кварцевых жил и гнезд кальцита к единому этапу метаморфизма. При условии, что кварц и кальцит формировались одновременно, и при этом между кислородом  $\text{CO}_2$  и кислородом кальцитов существовало геохимическое равновесие, разница в изотопном составе кислорода этих фаз ( $\Delta^{18}\text{O}$ ) при определенных здесь температурах (80–300°C) должна составлять от 10 до 12‰, SMOW [14], при этом углекислый газ должен быть обогащен изотопом  $^{18}\text{O}$  относительно сосуществующего с ним кальцита. В изученных нами жильных образованиях установленная между этими фазами разница значений по кислороду не превышает 1.5–2‰, SMOW, при этом углекислый газ включений облегчен  $^{18}\text{O}$  относительно кальцита. Данное наблюдение говорит, что источник воды при формировании кварца и кальцита был различен, при этом минералообразующие флюиды не испытывали сме-

шения. Таким образом, на основании изотопных данных можно сделать вывод о том, что кварцевые жилы и гнезда кальцита в них формировались в разное время, и источник углерода для каждого этапа гидротермальной деятельности был различен. Близкие характеристики по кислороду  $\text{CO}_2$  из газовой-жидких включений в кварце и кислороду кальцитов в нашем случае отражают схожие температурные условия различных этапов гидротермальной деятельности.

## ВЫВОДЫ

Очень широкие интервалы температур гомогенизации сингенетических включений, давления минералообразующей среды, солёности минералообразующих растворов свидетельствуют о длительности процесса образования жильного кварца, что характерно для гидротермально-метаморфогенных образований. На заключительном этапе минералообразования на фоне снижения температуры и давления наблюдается формирование прожилков и гнезд, состоящих из кальцита и эпидота. Этот вывод подтверждается полевыми наблюдениями возрастных взаимоотношений этих минералов в составе кварцевых жил.

Согласно прямым наблюдениям и расчетным данным по изотопному составу кислорода, водорода и углерода изученных фаз, вода, формировавшая как кварцевые, так и кальцитовые жилы имела преимущественно метеогенное (инфильтрационное), либо морское происхождение. Изотопный состав углерода углекислого газа в ГЖВ кварца отражает глубинный источник его поступления. При формировании кальцитов в углеродсодержащих фазах гидротермальных растворов в значительном количестве присутствовал углерод корового биогенного происхождения.

По мнению Л.И. Ефановой, на изученной площади развит золото-кварцевый тип оруденения. В то же время, в результате проведенных термобарогеохимических исследований подтверждений этому пока не найдено. Нами не найдены включения, которые обычно встречаются в золоторудном кварце. По мнению других авторов, кварцевая минерализация вероятно сформировалась позднее. Формирование кварцевых жил происходило по тектонически ослабленным зонам, в том числе и по сильно катаклазированным породам, содержащим золоторудную минерализацию. Тем не менее, в некоторых шлифах видно, что образование кварца в некоторых случаях происходило одновременно с рудной минерализацией. Вполне возможно, что была другая генерация кварца, слабо сохранившаяся, но процессы катаклазирования пород, которые на данных проявлениях развиты очень широко, разрушили первичную информацию. Для окончательного решения

вопроса о формирования золоторудной минерализации в районе необходимы дополнительные исследования.

Авторы выражают большую благодарность сотрудникам Института геологии и минералогии СО РАН А.А. Томиленко и Н.А. Гибшер за помощь и научные консультации; сотрудникам Института геологии Коми НЦ УрО РАН Т.В. Якимовой, И.В. Смолевой и С.А. Забоевой за проведенные анализы; начальнику Рудной партии ЗАО Голд Минералс А.Ф. Карчевскому за помощь в проведении полевых исследований.

*Работа выполнена при поддержке Гранта президента РФ "Ведущие научные школы" НШ-7198.2010.5, Программы ОНЗ РАН № 2 (09-Т-5-1015) и Интеграционного проекта ОНЗ РАН № 5 (09-С-5-1022).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрусенко Н.И., Адрианова С.И. Особенности формирования месторождений золота различных глубин и рудных формаций // Теория и практика термобарогеохимии. М.: Наука, 1978. С. 143–151.
2. Борисенко А.С. Определение карбонатов и бикарбонатов натрия в растворах газовой-жидких включений методом криометрии // Минералогия эндогенных образований (по включениям в минералах). Вып. 2. Новосибирск: Ротопринт, 1975. С. 98–105.
3. Долгов Ю.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Флюидный режим формирования и термобарогеохимические критерии золотоносности кварцевых жил в метаморфических породах // Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Новосибирск: Ротопринт, 1990. С. 7–19.
4. Павлунов Н.Н. Газометрические модели // Термобарогеохимия золота. Львов: Свит, 1995. С. 189–191.
5. Пальмова Д.Г., Копнева Л.А., Иванов П.А., Прусаков А.М. Физико-химическая характеристика золотоносных растворов // Теория и практика термобарогеохимии. М.: Наука, 1978. С. 101–106.
6. Попивняк И.В. Основные термобарогеохимические критерии прогнозирования и оценки золотого оруденения // Термобарогеохимия золота. Львов: Свит, 1995. С. 215–227.
7. Рай Р., Омото Х. Обзор исследований изотопов серы и углерода применительно к проблеме генезиса руд // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М.: Мир, 1977. С. 176–212.
8. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 1987. 558 с.
9. Сокерина Н.В. Флюидный режим формирования жильного кварца золоторудных объектов Приполярного Урала (по данным изучения газовой-жидких включений). Сыктывкар: Геопринт, 2003. 19 с.
10. Стырикович М.А., Хайбуллин И.Х. Диаграммы фазовых равновесий системы  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2(\text{кварц})\text{-H}_2\text{O}$  // Докл. АН СССР. 1956. Т. 109. С. 962–965.



11. Ткачев Ю.А., Пунегов А.И. Разделение смеси распределений на две нормальные компоненты. Сыктывкар: Геопринт. 1986. 31 с.
12. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
13. Potter R.V. Pressure correction for fluid-inclusion homogenization temperatures, based on the volumetric properties of the system NaCl-H<sub>2</sub>O // U.S. Geol. Survey Res. 1977. V. 5. P. 603–607.
14. Taylor H.P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition // Econ. Geol. 1974. V. 69, № 6. P. 843–883.

Рецензент В.В. Мурзин.

## Conditions of gold ore manifestation vein quartz formation in Manitanyrd region (Prepolar Urals)

N. V. Sokerina\*, N. N. Zykin\*\*, L. I. Efanova\*\*\*, S. N. Shanina\*, Yu. S. Simakova\*

\*Institute of Geology of Komi Science Centre, Urals Branch of RAS

\*\*Moscow State University

\*\*\*CC Gold Minerals

Some gold ore manifestation are now discovered in Manitanyrd ore region. We investigated the samples from two of them: Verkhneniyayuskoye-1 and Verkhneniyayuskoye-2. Ore zones are represented by elongated areas of schistose rocks with concentration of quartz-sulfide, quartz and quartz-chlorite veins and veinlets. Mineralization of the enclosing rocks is very poor and is presented by diffuse sulfides on the schistosity planes. In order to determine mineral-forming conditions we studied gas-liquid inclusions in such transparent minerals as quartz, calcite, epidote and axinite in gold-bearing and barren veins. It was established that thermobarogeochemical characteristics of gold-bearing and barren quartz veins are not distinguished. Monophase water inclusions are typical of them; homogenizing temperatures of two-phase inclusions are about 70–400°C. Design pressure is about 1–250 kg/cm<sup>2</sup>. Gas-liquid inclusions in gold-bearing and barren quartz have almost equal salinity (0–17 and 4–16.5 wt %) (NaCl equiv.) correspondingly. Salt composition of the inclusions is also resembled. Eutectic temperature of the inclusions is about –23 и –35°C that corresponds to water-salt systems NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O and NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. Isotope compositions of inclusions in quartz are the evidence of two sources for mineral formation – mantle and crust.

Key words: *gold deposits, homogenization, gas-liquid inclusions, isotope compositions, eutectic temperature, chromatography.*