

УДК 553.546; 553.576

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(65-69)

М. Г. ВОЛКОВА¹, А. И. НЕПОМНЯЩИХ^{1,2}¹ Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия, mariavolkova2008@yandex.ru² Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, ainep@igc.irk.ru**РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОКРИОТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦИТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БУРАЛ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

Кварциты месторождения Бурал-Сардык рассматриваются как источник особо чистого кварцевого сырья, поэтому содержание в них флюидных включений является важной технологической характеристикой. Флюидные включения изучались в зернах кварца наиболее чистых разновидностей кварцитов «продуктивной толщи»: темно-серые, серые и светло-серые мелкозернистые кварциты и «суперкварциты».

Микрокриотермометрические параметры были измерены с помощью криотермокамеры Linkam THMSG-600 (ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН). Распределение флюидных включений в зернах кварца весьма неравномерное. Секущие трещины в зернах кварца содержат флюиды, образуют густонасыщенные ленточные скопления и узкие цепочки, которые пересекаются, простираются параллельно или расположены обособленно. При комнатной температуре наблюдаются двухфазовые флюидные включения. Встречаются флюиды уплощенные изометричной, округлой формы и сложной морфологии с апофизами.

В разных типах кварцитов размеры флюидных включений различаются, а характер распределения и фазовый состав одинаковый. Замерить микрокриотермометрические параметры в некоторых включениях не удалось из-за их небольшого размера (менее 8 мкм). Температура плавления льда была измерена во флюидах с хорошо различной жидкой фазой. Результаты исследований показали, что концентрации солей во флюиде (от 5 до 9 мас.% экв. NaCl) и его плотность возрастают в направлении от сверхчистых «суперкварцитов» к серым кварцитам. В том же направлении происходит увеличение размеров флюидных включений. Определено, что «суперкварциты» характеризуются более высокими значениями P–T-условий образования по сравнению со светло-серыми мелкозернистыми и серыми кварцитами.

Ключевые слова: флюидные включения, кварциты, микротермометрия, солевая система флюида, давление, концентрация солей.

M. G. VOLKOVA¹ AND A. I. NEPOMNYASHCHIKH^{1,2}¹ A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 664033, Irkutsk, Favorskogo str., 1a, Russia, mariavolkova2008@yandex.ru² Irkutsk Scientific Center SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 134, Russia, ainep@igc.irk.ru**THE RESULTS OF THE MICROTHERMOMETRY INVESTIGATIONS OF FLUID INCLUSIONS IN QUARTZITES FROM THE BURAL-SARDYK DEPOSIT (EASTERN SAYAN)**

Quartzites from Bural-Sardyk deposit are considered to be a source of high purity quartz raw material. The contents of fluid inclusions (FI) in quartzite is therefore an important technical characteristic. Fluid inclusions were studied in quartz grains of the most clean varieties of quartzites of the «productive series»: dark grey, grey and light grey fine-grained quartzites, and «superquartzites».

The microcryothermometric parameters were measured using Linkam THMSG-600 thermal/freezing stage (Center for Isotopic-Geochemical Studies, IGC SB RAS, Irkutsk). The distribution of fluid inclusions in quartz grains is irregular. Cross fractures in quartz grains contain fluids, form band clusters with dense concentrations and narrow chains that intersect each other, extending in parallel or spaced apart. Two-phase fluid inclusions are observed at room temperature. Fluids that are flattened, isometric, rounded and complex in shape are nor rare.

The fluid inclusions differ in size in various types of quartzites, while the pattern of the distribution and phase composition are the same. It is practically impossible to measure microthermometric parameters in some fluid inclusions because of their minute size (less than 8 microns). The temperature of ice melting was measured in fluid inclusions with a well-defined liquid phase. The analysis results showed that the salinity of fluid (from 5 to 9 wt.% NaCl-eq.) and its density increase from ultrapure «superquartzites» to grey quartzites, with the FI sizes increasing in the same direction. It was established, that «superquartzites» are characterized by higher P–T-values of their formation conditions as compared to those of light grey and grey fine-grained quartzites.

Keywords: fluid inclusion, quartzite, microthermometry, salt system of fluid, pressure, salinity.

ВВЕДЕНИЕ

Кварциты месторождения Бурал-Сардык представляют интерес в первую очередь как источник кварцевого сырья, которое является нерудным полезным ископаемым, широко используемым во всех отраслях промышленного производства. При этом техническими условиями строго определяется химический состав кварцитов и, конечно, содержание в них как минеральных, так и флюидных включений (ФВ). Таким образом, исследование ФВ в кварцитах является актуальной задачей и необходимым условием для установления возможностей их практического использования. На этом объекте впервые были проведены микрокриотермометрические исследования ФВ.

КРАТКАЯ ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КВАРЦИТОВ

Месторождение Бурал-Сардык является наиболее значимым и хорошо изученным объектом в Восточно-Саянской кварцитоносной провинции. Геологическое строение и модели образования этого месторождения подробно описаны в работах [1–4].

Тела кварцитов представляют собой прослой монокварцевых пород мощностью в первые сотни метров. В верхах разреза расположены «суперкварциты», светло-серые мелкозернистые и серые кварциты; в низах — темно-серые кварциты и пачка высокоуглеродистых шунгитоподобных тел [2].

Кварциты месторождения поделены на две группы по содержанию петрогенных, редких и редкоземельных элементов. Первая группа — это кварциты так называемой продуктивной толщи: темно-серые, серые и светло-серые мелкозернистые кварциты и «суперкварциты». Для них характерны низкие концентрации породообразующих и редких элементов, т. е. они более химически чистые с позиции промышленной пригодности. Ко второй группе относят кварциты, тяготеющие к контакту с гранитоидами, вследствие чего содержание петрогенных и редких элементов в них выше, чем в кварцитах первой группы, на два порядка [2, 5].

ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

В работе представлены результаты исследования ФВ в наиболее чистых, с технологической точки зрения, четырех разновидностях кварцитов «продуктивной толщи».

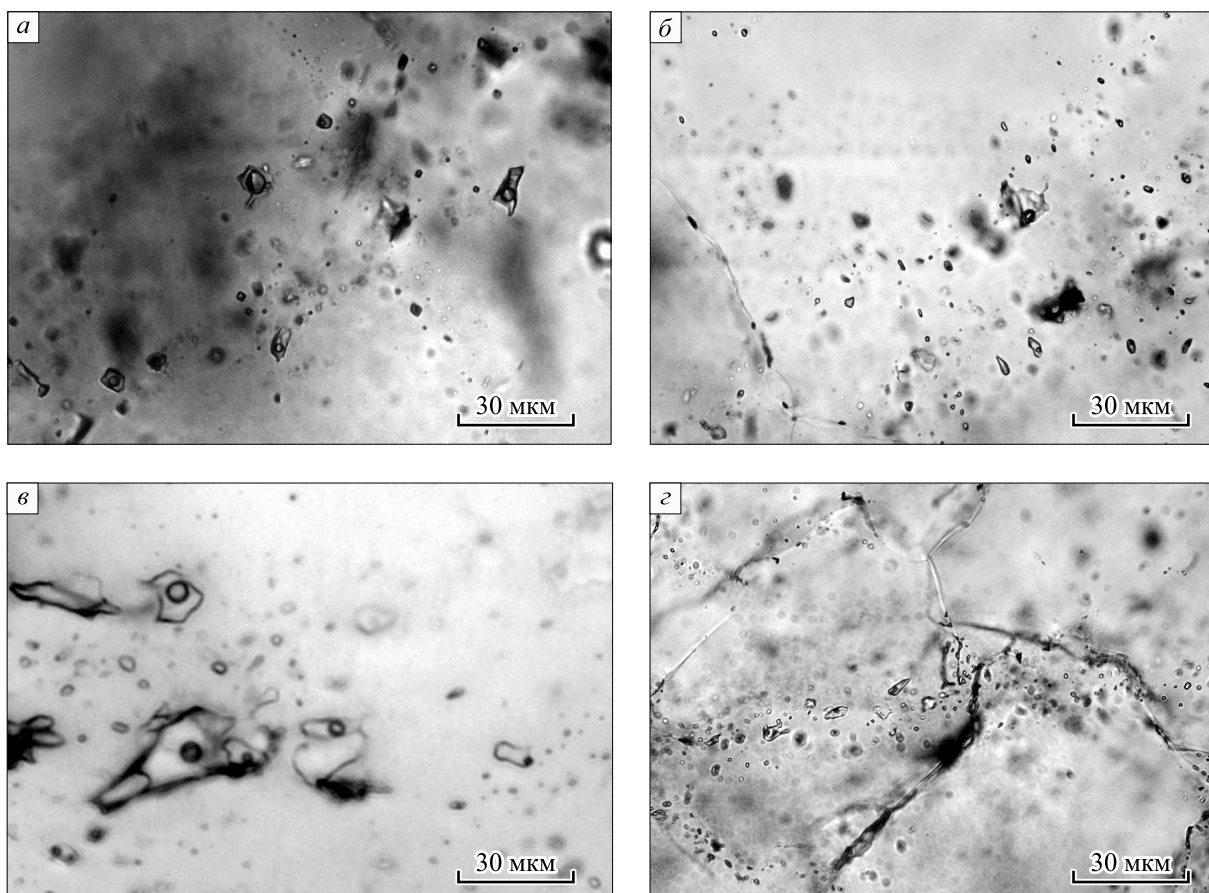
Для проведения исследования были изготовлены двусторонне полированные прозрачные пластины толщиной 0,3–0,5 мм. Пластины отмачивали в ацетоне ЧДА, затем отклеивали от стекла и промывали этиловым спиртом. Предварительное визуальное изучение препаратов проводилось как в проходящем, так и в отраженном свете с помощью микроскопа Olympus BX 51. Затем от пластины механически отделяли участки зерен кварца (от 3 × 3 до 4 × 4 мм), содержащие ФВ, отобранные для микрокриотермометрических измерений. Фотографирование объектов производилось фотокамерами PixeLink 1394 и QImaging MicroPublisher 5.0 RTV. Флюидные включения, пригодные для исследований (размером более 5 мкм), обнаружены в 10 пластинах.

Микрокриотермометрические параметры были замерены с помощью криотермокамеры Linkam THMSG-600 (ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН). Она оборудована управляющим программным обеспечением LinkSys 32-DV и позволяет измерять температуры фазовых переходов в интервале от –196 до +600 °С. Точность измерений составляет ±0,1 °С в интервале температур от –20 до +80 °С и ±1 °С за пределами этого интервала.

Температуры полной и частичной гомогенизации газового пузыря в жидкость фиксировали в момент его исчезновения при нагревании препарата в криотермокамере. Концентрации солей и давления рассчитывались в программе FLINCOR [6], а также с использованием данных из [7, 8].

Флюидные включения в «суперкварцитах». Распределение включений в зернах кварца «суперкварцитов» незакономерное (см. рисунок). Секущие трещины в зернах кварца содержат ФВ, образуют густонасыщенные ленточные скопления (шириной от 10 до 25 мкм) и узкие цепочки, которые пересекаются, простираются параллельно или расположены обособленно.

Встречаются ФВ уплощенные изометричной, округлой формы и сложной морфологии (см. рисунок, а). Размер ФВ в поперечнике до 12 мкм, что затрудняет их визуальное изучение и существенно сужает круг методов, позволяющих определить их состав. Отмечаются преимущественно газовые ФВ размером менее 3 мкм в поперечнике по зонам роста или в залеченных трещинах. При комнатной температуре в зернах кварца наблюдаются двухфазовые ФВ, где газовый пузырек составляет от 25 до 35 об.% вакуоли (см. рисунок, а).



Флюидные включения в разных типах кварцитов месторождения Бурал-Сардык.

a — «суперкварциты»; *б* — светло-серый мелкозернистый кварцит; *в* — серый кварцит; *з* — темно-серый кварцит.

При быстром охлаждении ФВ до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит замерзание жидкой фазы. Из-за небольшого размера ФВ наблюдать изменения состояния сложно, поэтому не удалось точно установить температуру эвтектики растворов. Температура плавления льда была замерена в восьми ФВ с хорошо различимой жидкой фазой, она изменяется от $-3,5$ до $-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сокращение объема газа в процессе нагрева в большинстве ФВ начиналось при температуре более $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гомогенизация происходит в жидкую фазу, даже если газовый пузырек занимает 35 % от объема ФВ. Полная гомогенизация ФВ имела место в интервале температур от 235 до $247\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате расчетов [7, 8] концентрация солей в составе флюида соответствует 5,5–5,7 мас.% экв. NaCl, его плотность составляет $0,86\text{--}0,89\text{ г/см}^3$, а давление — от 2,1 до 2,3 кбар (см. таблицу).

Флюидные включения в светло-сером мелкозернистом кварците. В зернах светло-серого мелкозернистого кварцита встречаются флюидные включения размером до 15 мкм в поперечнике, уплощенной

Результаты микрокриотермометрических исследований флюидных включений в кварцитах месторождения Бурал-Сардык

Показатель	«Суперкварциты»	Светло-серый мелкозернистый кварцит	Серый кварцит	Темно-серый кварцит
Количество ФВ, пригодных для измерений	15	27	32	Нет
Размер ФВ, мкм	До 12	До 15	До 37	Менее 8
Температура гомогенизации в жидкость, $^{\circ}\text{C}$	235–247	189–192	189–190	Не опр.
Температура плавления льда, $^{\circ}\text{C}$	$-3,5\text{...}-3,4$	$-6,1\text{...}-5,9$	$-6,1\text{...}-6,0$	»
Концентрация солей, мас.% экв. NaCl	5,5–5,7	9,1–9,4	9,1–9,4	»
Плотность флюида, г/см^3	0,86–0,89	0,94–0,95	0,94–0,95	»
Давление, кбар	2,1–2,3	1,8–1,9	1,8–1,9	»

и неправильной формы (см. рисунок, б). Характер распределения и фазовый состав ФВ такой же, как и в «суперкварците». При комнатной температуре в двухфазовых ФВ газовый пузырек занимает меньший объем и составляет от 10 до 15 об.% вакуоли во ФВ неправильной формы и от 15 до 25 об.% вакуоли — в других. Внутри зерен кварца также наблюдаются преимущественно газовые ФВ размером менее 5 мкм в поперечнике (см. рисунок, б).

Измерения микротермометрических параметров проводились по 27 флюидным включениям размером 8–15 мкм, разнообразной формы. Было определено, что температура плавления льда варьирует от $-6,1$ до $-5,9$ °С, а температура гомогенизации в жидкость — от $189,1$ до $192,1$ °С. Рассчитанные концентрации солей [7, 8] составляют $9,1-9,4$ мас.% экв. NaCl, плотность — $0,94-0,95$ г/см³, а давление — от $1,8$ до $1,9$ кбар (см. таблицу).

Флюидные включения в сером кварците. Самые крупные и наиболее подходящие для исследований ФВ были обнаружены в зернах серого кварцита. Здесь встречаются ФВ размером до 37 мкм (см. рисунок, в), при этом доля ФВ крупного размера (13–32 мкм) достаточно велика и составляет примерно 15 %. Мелкие ФВ имеют округлую неправильную форму, а крупные — сложную с многочисленными апофизами. Обнаруженные ФВ наблюдаются в виде цепочек, которые в свою очередь формируют широкие протяженные полосы (часто до 75 мкм), часто выходящие за пределы одного зерна. В таких полосах отмечаются ФВ разнообразной размерности. Фазовый состав ФВ такой же, как и в двух предыдущих типах пород. Газовый пузырек в ФВ, как правило, небольшой — около 10 об.% вакуоли, реже встречаются пузыри, занимающие до 25–30 об.% вакуоли (см. рисунок, в).

Измерения микротермометрических параметров проводилось по 32 флюидным включениям размером от 13 до 37 мкм. В итоге были установлены температура плавления льда от $-6,1$ до $-6,0$ °С и температура, при которой произошла гомогенизация в жидкость, равна $189-190$ °С. Эти значения попадают в диапазон данных, полученных по ФВ в светло-серых мелкозернистых кварцитах (см. таблицу).

Флюидные включения в темно-сером кварците. Флюидные включения в зернах темно-серого кварцита имеют размеры менее 8 мкм в поперечнике (см. рисунок, г). Это делает невозможным определение их состава с помощью микротермометрических исследований, так как сложно отследить изменения их состояния. Как и в других изученных типах кварцитов, ФВ здесь встречаются в виде цепочек и узких полос (шириной около 10 мкм), протягивающихся часто сразу через несколько зерен. Цепочки приурочены к трещинам, иногда они тяготеют к межзеренному пространству. Форма ФВ сложная, с апофизами, неправильная, реже встречаются ФВ, имеющие уплощенную форму (см. рисунок, г). Фазовый состав ФВ идентичен составу во всех других изученных типах кварцитов. Во флюидных включениях темно-серого кварцита отмечаются самые маленькие газовые пузыри, составляющие от 5 до 10 об.% вакуоли.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В разных типах кварцитов месторождения Бурал-Сардык размеры ФВ различаются, при этом характер распределения и фазовый состав одинаковые. Для «суперкварцитов» концентрация солей в составе флюида соответствует $5,5-5,7$ мас.% экв. NaCl, его плотность равна $0,86-0,89$ г/см³, давление — от $0,8$ до $2,3$ кбар. Для светло-серых мелкозернистых и серых кварцитов эти характеристики одинаковы и составляют: концентрации солей — $9,1-9,4$ мас.% экв. NaCl; плотность — $0,94-0,95$ г/см³; давление — от $1,8$ до $1,9$ кбар (см. таблицу). Таким образом, концентрации солей во флюиде и его плотность возрастают в направлении от сверхчистых «суперкварцитов» к серым кварцитам. В том же направлении происходит увеличение размеров ФВ.

Полученные $P-T$ -параметры согласуются с данными работ Г. И. Крыловой с соавторами [9], а также указывают на более высокие значения $P-T$ -условий образования «суперкварцитов» по сравнению со светло-серыми мелкозернистыми и серыми кварцитами. Линейность формирования ФВ, а также большой разброс измеренных давлений (от $0,8$ до $2,4$ кбар) могут свидетельствовать о возникших в процессе перекристаллизации высокоградиентных напряжениях в толще «суперкварцитов».

Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» с использованием оборудования и методик ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анфилов В. Н., Кабанова Л. Я., Игуменцева М. А., Никандрова Н. К., Лебедев А. С.** Геологическое строение, петрография и минералогия месторождения кварцитов Бурал-Сарьдак (Восточный Саян) // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 7. — С. 18–23.
2. **Макрыгина В. А., Фёдоров А. М.** Преобразование кварцитов как следствие поздних тектонических событий в развитии Чуйской и Гарганской глыб // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54, № 12. — С. 1861–1870.
3. **Фёдоров А. М., Макрыгина В. А., Будяк А. Е., Непомнящих А. И.** Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдак (Восточный Саян) // Докл. РАН. — 2012. — Т. 442, № 2. — С. 244–249.
4. **Воробьёв Е. И., Спиридонов А. М., Непомнящих А. И., Кузьмин М. И.** Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // Докл. РАН. — 2003. — Т. 390, № 2. — С. 219–223.
5. **Кабанова Л. Я., Анфилов В. Н., Непомнящих А. И., Игуменцева М. А.** Петрография Сверхчистых кварцитов участка Бурал-Сарьдак, Восточный Саян // Литосфера. — 2014. — № 1. — С. 81–94.
6. **Brown P. E.** FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // Amer. Mineralogist. — 1989. — Vol. 74. — P. 1390–1393.
7. **Vodnar R. J.** Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1993. — Vol. 57, N 3. — P. 683–684.
8. **Vodnar R. J., Vityk M. O.** Interpretation of microtermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Application. — Siena, 1994. — P. 117–130.
9. **Крылова Г. И., Крейсберг В. А., Митрофанов А. А., Астафьев В. Н.** Газонасыщенность кварцевого сырья и валовое содержание в нем воды // Материалы XI Междунар. конференции по термобарогеохимии. — Александров, 2004. — С. 320–354.

Поступила в редакцию 19 октября 2016 г.