

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 553.546; 553.576

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В «СУПЕРКВАРЦИТАХ»
МЕСТОРОЖДЕНИЯ БУРАЛ-САРДЫК (*Восточный Саян*)

М.Г. Волкова¹, А.И. Непомнящих^{1,2}, А.М. Федоров^{1,2}, А.М. Махлянова¹, Н.В. Брянский^{1,2}

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

² Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1, Россия

Представлены результаты исследования флюидных включений (ФВ) в «суперкварцитах» месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян). «Суперкварциты» рассматриваются как источник особо чистого кварцевого сырья, поэтому присутствие в них ФВ является важной характеристикой качества. Впервые на данном объекте для изучения ФВ были применены не только метод микротермометрии, но и масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмы с лазерным испарением (LA-ICP-MS). Проведено исследование выделения летучих компонентов в крупке кварцита термодесорбционной масс-спектрометрией.

Установлено, что распределение ФВ в зернах кварца неравномерное. Встречаются ФВ уплощенной изометричной и округлой формы, чаще сложной морфологии, размером в поперечнике до 12 мкм. Концентрация солей в составе флюида соответствует 5.5—5.7 мас. % экв. NaCl, а основным элементом в составе его солевой системы является Na, а также на фоновом уровне присутствуют K и Mg. По данным масс-спектрометрического анализа в образце «суперкварцита» основным летучим компонентом является H₂O (от 39 до 124 г/т). Вторая по значимости — группа углеродсодержащих веществ (CO и CO₂, углеводороды). При ступенчатом прогреве образцов выделение H₂O происходит в двух областях — при низких температурах (с максимумом при 400 °С) и при высоких (выше 1000 °С). Результаты химического обогащения «суперкварцитов» указывают на низкие исходные содержания структурных примесей, что расширяет границы для применения данного типа сырья в производстве высокотехнологичных кварцевых изделий.

Флюидные включения, «суперкварциты», микротермометрия, солевая система флюида, особо чистые кварцевые концентраты.

FLUID INCLUSIONS IN «SUPERQUARTZITES» OF THE BURAL-SARDYK DEPOSIT (*East Sayan*)

M.G. Volkova, A.I. Nepomnyashchikh, A.M. Fedorov, A.M. Makhlyanova, and N.V. Bryanskii

We present results of study of fluid inclusions in «superquartzites» of the Bural-Sardyk deposit (East Sayan). «Superquartzites» are regarded as a source of extrapure quartz raw material; therefore, the presence of fluid inclusions in them is an important characteristics of their quality. We have first applied not only microthermometry but also LA-ICP-MS to study fluid inclusions in the above rocks. Release of volatiles in quartzite grit was studied by thermal-desorption mass spectrometry. The research has shown the uneven distribution of fluid inclusions in the quartz grains. The inclusions are flattened isometric or rounded (often, of complex morphology), up to 12 μm across. The concentration of salts in the fluid corresponds to 5.5—5.7 wt.% NaCl equiv., Na is the main element in its salt system, and K and Mg are present in background concentrations. According to mass-spectrometric analysis, water is the main volatile component in the «superquartzite» (39 to 124 ppm). Next in abundance are carbon-containing substances (CO, CO₂, and hydrocarbons). On stepwise heating of the samples, H₂O releases in two temperature regions: at low temperatures (with the maximum release at 400 °C) and at high temperatures (above 1000 °C). The results of the chemical enrichment of «superquartzites» indicate low initial contents of structural impurities, which expands the boundaries for the application of this type of raw material in the production of high-tech quartz products.

Fluid inclusions, «superquartzites», microthermometry, salt system of fluid, high-purity quartz products

ВВЕДЕНИЕ

Кварциты месторождения Бурал-Сардык представляют значительный практический интерес как источник особо чистого кварцевого сырья для ряда отраслей промышленности [Воробьев и др., 2003; Федотов и др., 2012; Макрыгина, Федоров, 2013]. Одной из важнейших характеристик качества природного кварца как сырьевого материала наряду с содержанием элементов-примесей и минеральных включений является наличие флюидных включений (ФВ).

На данном объекте впервые были проведены микротермометрические исследования ФВ, использован метод масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмы с лазерным испарением (LA-ICP-MS). Кроме того, в работе представлены результаты определения летучих компонентов в крупке кварцита термодесорбционной масс-спектрометрией.

ГЕОЛОГИЯ

В Восточно-Саянской кварцитоносной провинции выделяется около десятка проявлений кварцитов. Наиболее изученным является участок месторождения Бурал-Сардык. Оно находится в юго-восточной части Восточного Саяна, в пределах водораздельного хребта между реками Ока и Урик. Геологическое строение и модели образования месторождения кварцитов Бурал-Сардык детально описаны в работах [Воробьев и др., 2003; Федоров и др., 2012; Макрыгина, Федоров, 2013; Анфилов и др., 2015]. Площадь месторождения представляет собой ряд хребтов и холмов с главной вершиной Бурал-Сардык (2778 м), вытянутых в северо-восточном направлении и отделенных друг от друга современными отложениями [Аржанникова и др., 2013]. Кварциты слагают прослои мощностью от первых десятков до первых сотен метров среди карбонатных отложений рифейского чехла Гарганской глыбы архей-нижнепротерозойского возраста [Кузнецов и др., 2010]. Пачки кварцитов имеют наибольшую мощность в северо-западном обрамлении глыбы. Продуктивные тела представляют собой монокварцевые породы, степень перекристаллизации которых уменьшается в направлении сверху—вниз. Они локализируются в привершинной части хребта Бурал-Сардык в виде пологопадающих на з.—с.-з. под углами 7—10° пластов. В верхней части разреза расположены максимально переработанные «суперкварциты» [Воробьев и др., 2003] и осветленные мелкозернистые кварциты. В нижней части расположены темно-серые кварциты и маломощная пачка высокоуглеродистых шунгитоподобных тел.

«Суперкварциты» характеризуются практически мономинеральным кварцевым составом и неравномерно-зернистой, аллотриоморфно-зернистой структурой. В породе на фоне непрозрачного мелкозернистого кварцевого агрегата наблюдаются крупные прозрачные зерна кварца субпараллельной ориентировки. Зерна кварца имеют извилистые, зубчатые границы, волнистое, облачно-мозаичное погасание. От 5 до 50 об. % породы сложено крупными и средними зернами с размерами по длинной оси от 1.6×0.5 до 4×2 мм, редко до 9.4 мм. Зерна мелких размеров (от 0.5×0.3 до 1.4×0.6 мм) имеют неправильную, иногда удлинённую форму и неровные зубчатые очертания. В породе отмечаются редкие чешуйки серицита, кроме того, в межзерновом пространстве в виде тонких прожилков присутствует углеродистое вещество.

По содержанию петрогенных, редких и РЗЭ элементов кварциты месторождения Бурал-Сардык можно разделить на две группы [Федоров и др., 2012]. К первой группе относят кварциты «продуктивной толщи», а именно черные и темно-серые кремневидные кварциты, мелкозернистые светлые кварциты и «суперкварциты», отличающиеся низким содержанием породообразующих и редких элементов. Ко второй группе относят кварциты, контактирующие с интрузивными телами. В этих приконтактовых кварцитах содержание петрогенных и редких элементов на два порядка выше, чем в первой группе кварцитов [Федоров и др., 2012]. Наиболее распространенными на этом участке интрузивными телами являются гранитоиды Гарганского плутона сумсунурского комплекса (785 млн лет), которые А.Б. Кузьмичевым с соавторами [2004, 2011] интерпретируются как надсубдукционные.

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

При проведении *микротиермометрических исследований* ФВ изучались в двухсторонне-полированных прозрачных пластинах. Поиск ФВ и фотографирование препаратов проводился как в проходящем, так и в отраженном свете с помощью микроскопа Olympus BX 51, оборудованного фотокамерами PixeLink 1394 и QImagingMicroPublisher 5.0 RTV. Для всех видов исследований пластины отмачивались в ацетоне ЧДА, затем отклеивались от стекла и промывались этиловым спиртом. После визуального исследования от пластинки механически отделялись участки, содержащие наиболее подходящие для изучения ФВ. Размеры таких участков составляли от 3×3 до 4×4 мм.

Измерения микротиермометрических параметров выполнены на криотермокамере Linkam THMSG-600 (ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН), позволяющей определять

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. Криотермокамера оснащена управляющим программным обеспечением LinkSys 32-DV. Проводилось изучение двухфазовых ФВ размером более 5 мкм. Температуры полной гомогенизации в жидкость фиксировали в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере. Расчеты концентраций солей проводились с использованием программы FLINCOR [Brown, 1989], а также данных из работы [Bodnar, Vityk, 1994].

Определение содержания летучих компонентов в «суперкварците» проводилось *методом кинетической термодесорбционной масс-спектрометрии с количественным анализом потоков веществ*, выделяющихся в высокий вакуум при прогреве образца определенной степени дисперсности от комнатной температуры до 1400 °С в ступенчатом режиме нагрева. Образцы готовились в виде кварцевой крупки гранулометрического состава 174—450 мкм. Схема пробоподготовки для термодесорбционной масс-спектрометрии включает следующие процессы: ручное дробление до фракции 50 мм; промывка; дробление до фракции 25 мм; классификация до фракции 5—25 мм; химическое травление HCl—10 %; сушка; истирание в кварцевом истирателе. Работы выполнены В.А. Крейсбергом на химическом факультете МГУ. Подготовленный образец загружался в ампулу из отожженного кварцевого стекла и вакуумировался в течение суток. Все слабосвязанные, физически адсорбированные на поверхности примеси удалялись в высоком вакууме (10^{-7} — 10^{-8} торр) до начала масс-спектрометрического отжига. При последующем ступенчатом нагреве с интервалом в 200 °С постоянно регистрировалась кинетика выделения воды, а на изотермических участках нагрева записывался весь масс-спектр выделяющихся газообразных продуктов [Крейсберг, 2007].

Для определения состава водного раствора ФВ также был использован *метод LA-ICP-MS*. Данные получены на приборном комплексе, состоящем из квадрупольного масс-спектрометра NexION 300D и платформы лазерной абляции NWR-213 (ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН). Измерения сигналов проводилось по пятидесяти элементам. Параметры метода приведены в табл. 1.

Использование LA для пробоотбора в сочетании с квадрупольным масс-спектрометром позволяет анализировать ФВ малых размеров (до 5 мкм), выявить присутствие минеральных фаз в глубинных слоях материала и дает возможность анализировать быстроизменяющийся по составу аэрозоль пробы.

Содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах определялись методом ICP-MS. Навеску пробы обрабатывают азотной кислотой при повышенных давлениях и температуре в автоклавной установке для того, чтобы перевести в раствор. При наличии труднорастворимых элементов используют смесь фтористо-водородной и азотной кислот. Для предотвращения потерь бора в смесь кислот добавляют маннит, связывающий бор в комплексное соединение. Далее проводят концентрирование примесей путем удаления основного элемента в виде тетрафторида кремния. Соли переводят в азотно-кислотную форму, обрабатывая сухой остаток азотной кислотой. С целью ослабления взаимного влияния элементов полученный концентрированный раствор перед съемкой спектров дополнительно разбавляют [Сокольникова, Васильева, 2012]. Измерения проводили на масс-спектрометре NexION 300D (Perkin Elmer, Канада).

В качестве эталонного образца для контроля результатов ICP-MS анализа использовали кварцевые концентраты марки Iota (Iota STD и Iota 4) фирмы Unimin, широко используемые в мире для производства прозрачного кварцевого стекла [Бурьян и др., 2007]. Раствор пробы получали после деструкции

Таблица 1. Значения параметров для LA-ICP-MS

Параметры лазера	Значение
Лазер	Nd:YAG (NWR-213)
Длина волны	213 нм
Энергия в импульсе	9.36 Дж/см ²
Частота повторения импульсов	5 Гц
Количество импульсов	400
Диаметр пятна абляции	50 мкм
Длительность импульса	4 нс
Параметры ICP-MS	Значение
Скорость потока газа-носителя	0.6 л/мин He
Скорость потока несущего газа	0.8 л/мин Ar
Остальные газы: Plasma/Cool и Auxiliary Gas	18 л/мин и 2 л/мин Ar соответственно
Мощность плазмы	1400 Вт

навески смесью фтористо-водородной и азотной кислот при повышенных давлении и температуре в автоклаве и концентрирования примесей путем удаления основного элемента в виде тетрафторида. Калибровку масс-спектрометра по массам проводили с применением мультиэлементных стандартных растворов Combined Quality Control Standard IQC-026 (фирма Ultra Scientific, США) и ICP multi-element standard solution X (фирма MerckKGaA, Германия). В качестве внутреннего стандарта для контроля процесса измерения интенсивности сигналов используют раствор родия. Для взвешивания используют лабораторные весы 1-го или 2-го класса точности, для построения градуировочных графиков – мультиэлементные стандартные растворы Multi-element Solution 1-4 фирмы SPEX CertiPrep, Inc, США.

Контроль внутрилабораторной прецизионности проводят с применением методов параллельных навесок и повторного анализа проб (выборочно). Пределы обнаружения элементов рассчитывают по стандартной методике, учитывающей результаты контрольных опытов, 3σ -критерий и соответствующее разбавление растворов. С целью повышения точности измерений и уменьшения уровня концентраций элементов в контрольных опытах применяют сверхчистые реагенты: кислоты, очищенные методом суббойлинговой перегонки, и деионизированную воду.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что распределение ФВ в зернах кварца неравномерное. В центральной части крупных и средних по размеру зерен кварца насыщенность ФВ меньше, чем в краевых зонах и залеченных трещинах. В мелких зернах кварца ФВ менее 3 мкм и не пригодны для исследований. Включения образуют узкие цепочки, которые переходят в плотные ленточные скопления (шириной от 10 до 25 мкм), затем пересекаются (рис. 1, б), простираются параллельно или расположены обособленно. Наблюдаются уплощенные ФВ изометричной и округлой формы (см. рис. 1, а), а чаще ФВ сложной морфологии (см. рис. 1, б-г). Размер ФВ в поперечнике составляет до 12 мкм (см. рис. 1), что затрудняет их визуальное изучение и существенно сужает круг методов, позволяющих определить их состав. При комнатной температуре во ФВ газовый пузырек составляет от 25 до 50 об. % вакуоли (см. рис. 1).

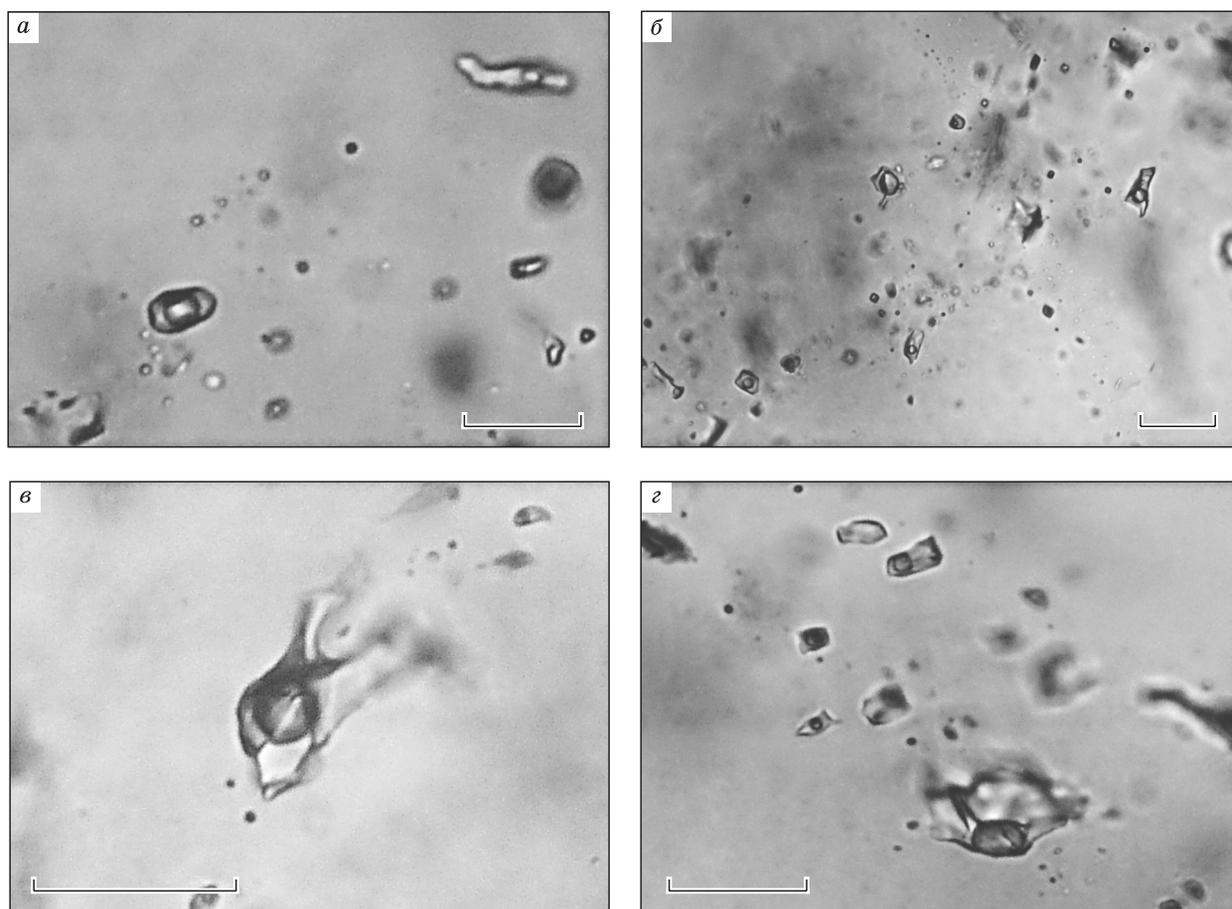


Рис. 1. Флюидные включения в «суперкварцитах» месторождения Бурал-Сардык.

Масштабная линейка составляет 10 мкм. а—г — описание см. в тексте.

Таблица 2. Результаты микрокриотермометрических исследований флюидных включений в «суперкварцитах» месторождения Бурал-Сардык

Параметр	Значение
Количество ФВ, пригодных для измерений (<i>n</i>)	15
Размер включений	до 12 мкм
Температура гомогенизации ФВ	235—247 °С
Температура плавления льда	–3.5...–3.4 °С
Концентрация солей	5.5—5.7 мас. % экв. NaCl

начиналось при температуре более 150 °С. Включения полностью гомогенизируются в жидкость в интервале от 235 до 247 °С (см. табл. 2).

В результате расчетов в программе FLINCOR [Brown, 1989], а также по методике из работы [Bodnar, Vityuk, 1994] определено, что концентрация солей в составе флюида соответствует 5.5—5.7 мас. % экв. NaCl (см. табл. 2).

Методом кинетической термодесорбционной масс-спектрометрии с количественным анализом потоков веществ (табл. 3) определено, что в «суперкварците» основным летучим компонентом является вода (от 39 до 124 г/т). Вторая по значимости — группа углеродсодержащих веществ (СО и СО₂, углеводороды). Термодесорбционные кривые (рис. 2) указывают на то, что выделение воды происходит в двух температурных областях. При низких температурах, с максимумом при 400 °С, оно обусловлено декрепитацией (растрескиванием) вакуолей с размером больше 15 мкм и поверхностной дегидратацией. При высоких температурах выделение воды связано с диффузией молекулярно-дисперсной растворенной формы воды в структуре кварца. В «суперкварците» после прокалки при 1450 °С (обр. 116/1) высокотемпературные формы воды и многих других примесей отсутствуют, но весьма значительно содержание низкотемпературной формы воды (см. рис. 2), что обусловлено увеличением удельной поверхности при кристобалитизации и, соответственно, адсорбцией.

В зернах «суперкварцита» методом LA-ICP-MS анализировались оптически чистые области (т. е. области, где нет флюидных и минеральных включений) (рис. 3, кратер 1) и зоны скопления ФВ (см. рис. 3, кратер 2). В данном случае необходимость анализа областей, где ФВ расположены максимально близко друг к другу и образуют скопления, а не индивидуальных ФВ, обусловлена их малыми размерами (см. рис. 1). Хотя локальность метода позволяет работать с объектами размером до 5 мкм, количества вещества в мелких индивидуальных ФВ оказывается недостаточно для регистрации стабильного аналитического сигнала. Анализ подобных объектов проводился ранее, и после подбора оптимальных параметров удалось добиться эффективного испарения материала [Махлянова и др., 2015].

Таблица 3. Содержание основных летучих компонентов в «суперкварците» по данным масс-спектрометрического анализа (г/т)

Образец	H ₂ O			CO ₂	CO	C _x H _x	ΣC	H ₂	HCl	H ₂ S	SO ₂
	< 600 °С	> 600 °С	Всего								
«Суперкварцит» без термодробления											
78/1	58.2	65.7	123.9	2.4	9.4	3.7	7.9	0.21	1.87	0.78	0.15
«Суперкварцит» после термодробления*											
80/1	11.1	27.8	38.9	1.3	3.6	3.0	4.5	0.10	0.02	0.16	0.01
«Суперкварцит» после прокалки при 1450 °С**											
116/1	42.0	3.9	45.9	0.4	4.4	4.8	6.2	0.05	0.02	0.01	0.00
Кварцевый концентрат Iota STD фирмы Unimin											
	18.6	17.2	35.8	1.3	4.5	3.9	5.7	0.51	0.21	0.01	0.03

Примечание. Анализы выполнены сотрудниками химического факультета МГУ к.х.н. В.А. Крейсбергом и В.П. Ракчевым.

* После химического травления куска проводилось термодробление, заключающееся в нагреве «суперкварцита» до температуры 900 °С и последующем быстром охлаждении в деионизованной воде.

** По содержанию «высокотемпературной» воды «суперкварцит» после прокалки при 1450 °С превосходит эталонные образцы кварца фирмы Unimin.

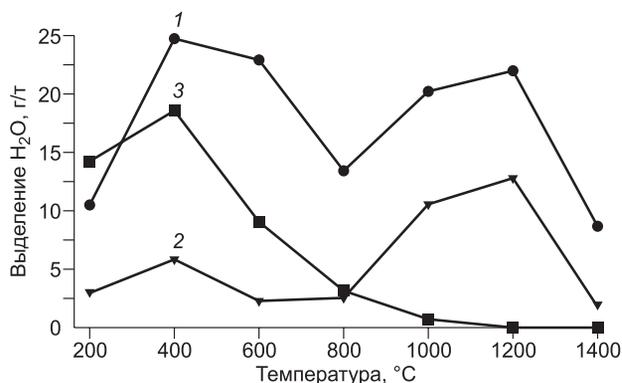


Рис. 2. Термодесорбция H₂O при ступенчатом прогреве крупки «суперкварцита» месторождения Бурал-Сардык с различными режимами термообработки по данным масс-спектрометрического анализа.

1 — обр. 78/1, «суперкварцит» без термодробления; 2 — обр. 80/1, «суперкварцит» после термодробления; 3 — обр. 116/1 — «суперкварцит» после прокалки при 1450 °C.

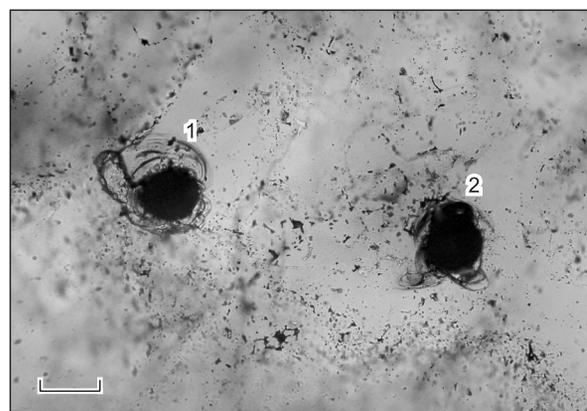


Рис. 3. Кратеры, полученные при LA-ICP-MS образцов «суперкварцита» в анализируемых областях.

Кратер 1 — оптически чистая область, кратер 2 — область скопления ФВ. Масштабная линейка составляет 50 мкм.

При расчете содержаний основных элементов в образцах «суперкварцита» в качестве стандарта использовалось синтетическое стекло NIST SRM 612 [Jochum et al., 2011]. Измерения проводились сериями, каждая из которых начиналась с лазерного испарения стандарта, оптически чистой области, далее анализировались скопления ФВ. Каждое значение концентрации было рассчитано из двух параллельных измерений.

В результате были получены аналитические сигналы и рассчитаны оценочные значения содержаний основных элементов в зонах скоплений ФВ (табл. 4). Как видно, концентрации калия, лития, бора и кальция в оптически чистых областях и областях скопления ФВ практически одинаковые и изменяются только в пределах погрешности. При этом содержание натрия в областях с ФВ увеличивается на порядок по сравнению с содержанием этого элемента в областях без ФВ (см. табл. 4) на всех исследуемых участках. Таким образом, можно утверждать, что основным щелочным элементом в составе водного раствора ФВ является натрий. Этот вывод также подтверждается результатами обогащения кварцевых концентратов, приведенными в табл. 5.

В табл. 5 представлены результаты определения содержания примесей в исходном «суперкварците» и в кварцевых концентратах после химического обогащения (ХО) кварцевой крупки. Специально

Таблица 4. Содержания основных элементов в образцах «суперкварцита» по данным LA-ICP-MS (г/т)

Тип области	⁷ Li	¹¹ B	²³ Na	²⁴ Mg	²⁷ Al	³⁹ K	⁴⁴ Ca
Оптически чистая область	0.58	0.35	0.12	8.20	0.15	0.72	0.21
Область скоплений ФВ	0.67	0.39	1.04	6.02	0.24	0.61	0.24

Примечание. Анализы выполнены в ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН к.ф.-м.н. Н.В. Брянским и А.М. Махляновой.

Таблица 5. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах (г/т)

Аналит	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10	P	B
Исходный	6	27	1.7	0.8	1	0.17	0.02	3.5	6.3	0.13	46.6	0.2	0.2
После ХО	0.9	4.5	0.8	0.4	0.2	0.14	0.005	2.5	0.5	0.12	10.1	0.1	0.18
Прокалка в Ag 1450 °C + ХО	1.1	4	0.6	0.4	0.2	0.18	0.006	0.2	0.3	0.18	7.2	0.1	0.16

Примечание. Анализы выполнены в ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН О.Н. Соловьевым и В.Ю. Пономаревой. Пояснения см. в тексте.

знаком $\Sigma 10$ выделено суммарное содержание десяти примесей, регламентированных для кварцевых концентратов. После термодробления проведено химическое обогащение, при котором удаляются растворимые в кислотах минеральные включения, происходит существенная очистка исходного материала от железа, алюминия, калия. Концентрация натрия при химическом обогащении снижается незначительно. Однако после прокалики обогащенного кварцевого концентрата при температуре 1450 °С, когда происходит фазовое превращение высокотемпературного кварца в кристобалит [Жабоедов и др., 2015] и, следовательно, вскрываются ФВ (последняя строка табл. 4), дальнейшее химическое обогащение приводит к резкому снижению натрия. Это подтверждает наш вывод по результатам LA-ICP-MS о том, что основным элементом в солевой системе флюида является натрий.

ВЫВОДЫ

В результате микрокриотермометрических исследований установлено, что концентрация солей в составе флюида соответствует 5.5—5.7 мас. % экв. NaCl.

По совокупным данным микрокриотермометрического анализа, LA-ICP-MS и ICP-MS можно считать установленным, что основным элементом в составе солевой системы флюида является натрий. Кроме того, на фоновом уровне присутствуют калий и магний.

Результаты химического обогащения «суперкварцитов» указывают на низкие исходные содержания структурных примесей, что расширяет границы для применения данного типа сырья в производстве высокотехнологичных кварцевых изделий.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Анфилогов В.Н., Кабанова Л.Я., Игуменцева М.А., Никандрова Н.К., Лебедев А.С. Геологическое строение, петрография и минералогия месторождения кварцитов Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян) // Разведка и охрана недр, 2015, № 7, с. 18—23.

Аржанникова А.В., Жоливе М., Аржанников С.Г., Вассалло Р., Шове А. Возраст формирования и деформации мезозойско-кайнозойской поверхности выравнивания в Восточном Саяне // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (7), с. 894—905.

Бурьян Ю.И., Борисов Л.А., Красильников П.А. Кварцевое сырье – важнейший вид минеральных ресурсов для высокотехнологичных отраслей промышленности // Разведка и охрана недр, 2007, № 10, с. 9—12.

Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И. Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // ДАН, 2003, т. 390, № 2, с. 219—223.

Жабоедов А.П., Непомнящих А.И., Середкин Е.А. Фазовые переходы в кварцитах месторождения Бурал-Сардык // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2015, № 4, с. 61—66.

Крейсберг В.А., Ракчев В.П., Серых Н.М., Борисов Л.А. Диагностика газовой-жидких примесей в кварце масс-спектрометрическим методом // Разведка и охрана недр, 2007, № 10, с. 12—18.

Кузнецов А.Б., Летникова Е.Ф., Вишневская И.А., Константинова Г.В., Кутявин Э.П., Гелетий Н.К. Sr-хемостратиграфия карбонатных отложений осадочного чехла Тувино-Монгольского микроконтинента // ДАН, 2010, т. 432, № 3, с. 350—355.

Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М., ПРОБЕЛ-2000, 2004, 192 с.

Кузьмичев А.Б., Ларионов А.Н. Сархойская серия Восточного Саяна: неопротерозойский (~770—800 млн лет) вулканический пояс андийского типа // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (7), с. 885—895.

Макрыгина В.А., Федоров 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.

Махлянова А.М., Брянский Н.В., Непомнящих А.И. Применение лазерной абляции для исследования газовой-жидких включений в природном кварце методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Изв. РАН. Сер. физическая. 2015, т. 79, № 2, с. 203—206.

Сокольников Ю.В., Васильева И.Е. Выбор условий химической пробоподготовки для анализа кварцитов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Вест. ИГТУ, 2012, № 1 (60), с. 119—127.

Федоров А.М., Макрыгина В.А., Будяк А.Е., Непомнящих А.И. Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян) // ДАН, 2012, т. 442, № 2, с. 244—249.

Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microtermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and application. Pontignano-Siena, Virginia Tech, 1994, p. 117—130.

Brown P.E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // Amer. Miner., 1989, v. 74, p. 1390—1393.

Jochum K.P., Weis U., Stoll B., Kuzmin D., Yang Q., Raczek I., Jacob D.E., Stracke A., Birbaum K., Frick D.A., Günther D., Enweiler J. Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO Guidelines // Geostand. Geoanalyt. Res., 2011, v. 35, № 4, p. 397—429.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию
24 июня 2016 г.*