

© Непомнящих А. И.*, **, ****, Волкова М. Г.*, **,
Жабоедов А. П.*, **, Лесников А. К.***, Лесников П. А.***, Паклин А. С.*,
Сизова Т. Ю.*, Спиридовон А. М.*, Федоров А. М.*,**, Шалаев А. А.*,
Шендрек Р. Ю.*

ОПТИЧЕСКОЕ СТЕКЛО ИЗ КВАРЦИТОВ ВОСТОЧНОГО САЯНА

* Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
** Иркутский научный центр СО РАН,
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134,
*** ООО «НПФ Кварцевое стекло»,
Россия, 192171, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, 36, корп. 1
**** ЗАО «Кварцевые материалы»,
Россия, Иркутск, ул. Фаворского, 1а,
e-mail: ainep@jgc.irk.ru

Представлены результаты исследования четырех разновидностей высоко-чистых кварцитов Ока-Урикского блока, исходных кварцитов Уренгенурского блока Восточного Саяна и гранулированного кварца Патомского нагорья (жила 2821). Выделены текстурно-структурные особенности, минеральные и флюидные включения во всех типах кварцевого сырья. Для каждого типа разработаны схемы получения особо-чистых кварцевых концентратов. Методом вакуумно-компрессионной плавки получены оптические стекла и измерены их спектральные характеристики.

Ключевые слова: кварц, кварциты, суперкварциты, кварцевое стекло, кварцевая керамика, минеральные включения, флюидные включения.

Введение. Природное кварцевое сырье широко используется для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой чистоты. На основе этих концентратов производится оптическое кварцевое стекло для видимой и ближней инфракрасной областей спектра, а также высокотемпературная кварцевая керамика самого широкого применения. Традиционно для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой чистоты используются горный хрусталь и жильные разновидности кварца различных геолого-промышленных типов [1]. Как правило, жильные тела кварца имеют небольшие запасы и характеризуются высокой степенью неоднородности. В связи с возрастающей потребностью в высококачественном кварцевом сырье и истощением запасов традиционных кварцевых месторождений возникает острая потребность в поисках и оценке других нетрадиционных источников особо чистого кварцевого сырья. Примером такого источника высококачественного кварцевого сырья являются кварциты Восточного Саяна [2].

Такой тип особо-чистого кварцевого сырья (месторождение Бурал-Сардык, проявления Урдагарганско, Окинское, Уренгенурское и др.) был выявлен в [2—5]. Было установлено, что кварциты Восточного Саяна, детально изученные на примере

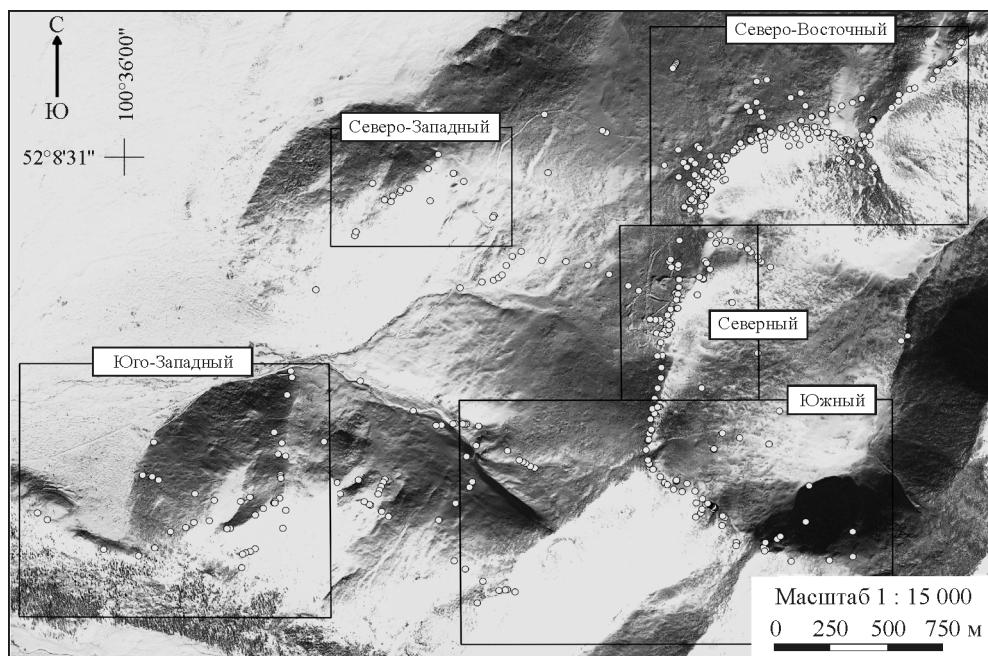


Рис. 1. Ока-Урирский блок восточно-саянского кварцитоносного узла.

месторождения Бурал-Сардык, обладают высокой степенью однородности и чистоты. На основе высокочистого кварцевого сырья данного месторождения — «суперкварцитов» [2], было получено оптическое кварцевое стекло марки КИ [5].

Приводимые в работе результаты основываются на детальном изучении 4 разновидностей кварцитов, отобранных на северном (месторождение Бурал-Сардык) и юго-западном участках Ока-Урирского блока (рис. 1), исходных кварцитов Уренгейнурского блока и гранулированного кварца Анахчи-Чипикетского жильного поля Патомского нагорья (жила 2821). Пространственно Гарганский кварцитоносный район находится в юго-восточной части Восточного Саяна, в северном секторе Тувино-Монгольского массива (Гарганская глыба) [6, 7]. Фундамент глыбы перекрыт осадочным чехлом, основание которого сложено рифейскими (возраст 1.25 млрд лет) кремнисто-карбонатными отложениями иркутской свиты, являющимися продуктивными на высокочистые кварциты. Отложения осадочного чехла прорываются гранитоидными интрузиями сумсунурского комплекса плагиогранитов (790 млн лет) [7], которые располагаются к юго-западу от Ока-Урирского блока. Всего в пределах этого блока по пространственному расположению и вещественному составу кварцитов выделено 6 рудоносных участков (рис. 1). Наиболее детально изучен Северный участок данного блока, который получил название «месторождение Бурал-Сардык». Он расположен на северном склоне горы Бурал-Сардык, на высотных отметках 2600—2670 м. Бурением скважин, выполненных при разведке месторождения, установлено, что продуктивные тела суперкварцитов и подстилающих их осветленных мелкозернистых кварцитов имеют пластовую форму и пологое падение в направлении на запад-северо-запад. При этом мощность пласта мелкозернистых кварцитов в целом колеблется от 8 до 14 м, суперкварцитов — от 6 до 12 м. На этом участке нами отобраны пробы суперкварцитов и мелкозернистых кварцитов (рис. 2, а, б).

На юго-западном участке отобраны образцы сливного кварца (рис. 2, в) и на северо-восточном участке образцы крупнозернистого кварцита (рис. 2, г) подобного суперкварцитам северного участка.

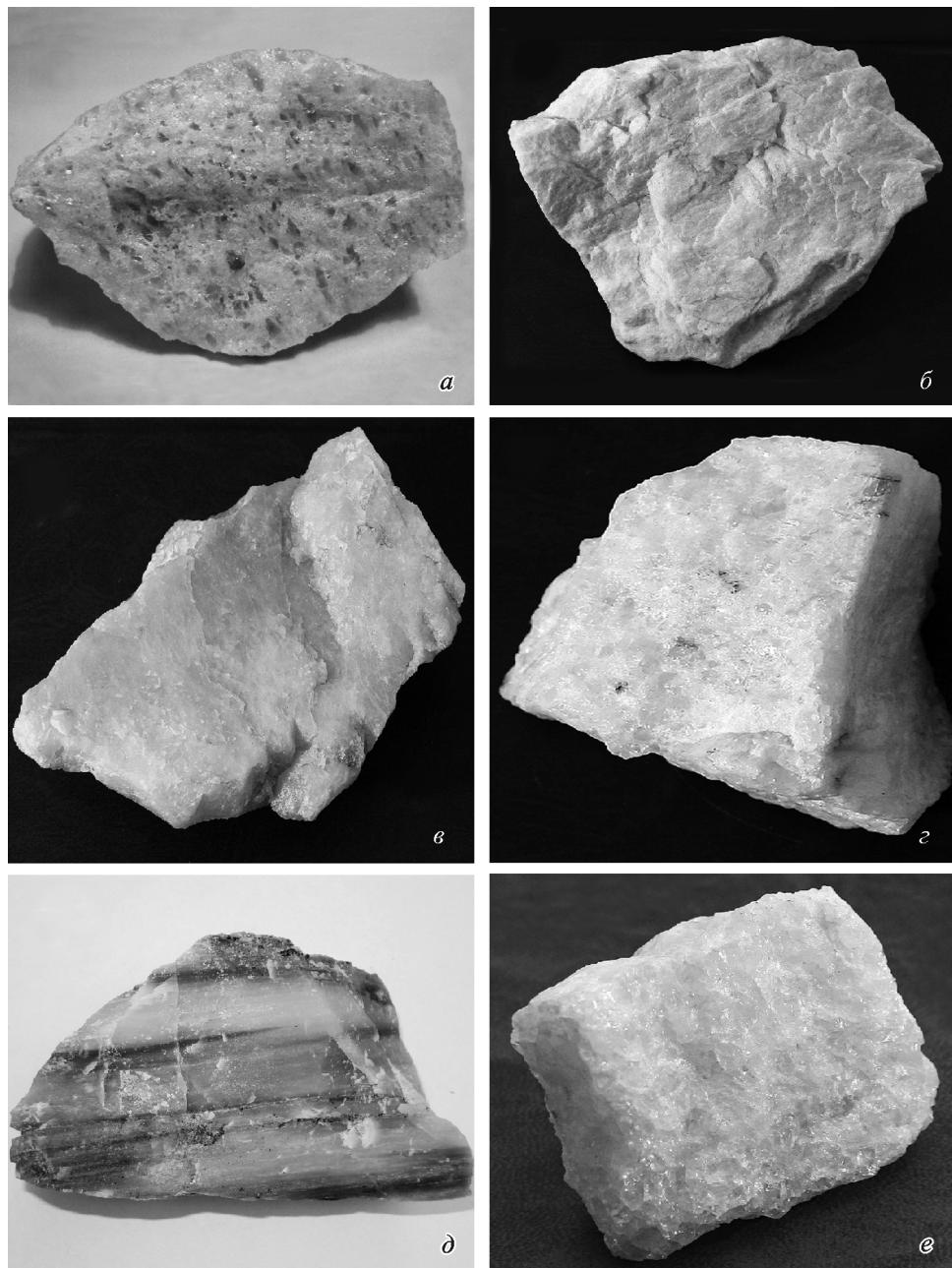


Рис. 2. Образцы кварцевого материала: суперкварциты (*а*), мелкозернистый кварцит (*б*), сливной кварц (*в*), крупнозернистый кварцит северо-восточного участка (*г*), кварциты участка Уренгенур (*д*), гранулированный кварц Анахчи-Чипикетской группы жил (*е*).

Проявление Уренгенурское расположено в южном секторе Гарганской глыбы, на левобережье р. Оки, где обнажаются карбонатно-кремнистые ритмично-полосчатые отложения иркутской свиты [4]. Образец кварцита с этого участка представлен на рис. 2, *д*.

Для сравнения в данной работе представлены результаты исследований минерального и химического составов образцов гранулированного кварца жилы 2821, отобранных на Анахчи-Чипикетском жильном поле Патомского нагорья (рис. 2, е). Анахчи-Чипикетская группа жил выделяется среди существенно терригенных осадочных пород неопротерозойского возраста, относимых к Патомской серии [8]. Жильные тела залегают согласно с падением вмещающих пород и выделяются в виде линзообразных тел и развалов на площади более 50 км². Размеры линз варьируются в пределах от нескольких до 200 и более метров по простирианию и до 5—7 м по мощности в раздувах. Всего в пределах Анахчи-Чипикетской группы жил выделяется более 100 тел, выполненных кварцем трех основных геолого-промышленных типов: гранулированным, прозрачным стекловидным и белым непрозрачным. Наибольший практический интерес представляют гранулированные прозрачные разновидности кварца. Благодаря перекристаллизации они не содержат структурных примесей, минеральных и флюидных включений. Наиболее изученной в пределах поля является жила 2821, по которой балансовые запасы составляют 32.8 тыс. т. Фотографии образцов всех 6 типов кварцевого сырья приведены на рис. 2.

Характеристика образцов. *Суперкварциты.* Высокочистые разновидности кварцитов месторождения Бурал-Сардык, названные ранее «суперкварциты» [2] (рис. 2, а), характеризуются мономинеральным кварцевым составом (99.9 % породы). На фоне мелко- (< 0.2 мм) и среднезернистых (0.2—2 мм) кварцевых агрегатов выделяются прозрачные бесцветные удлиненные зерна кварца размерами до 3 мм. Они ориентированы либо субпараллельно, либо не имеют четкой ориентировки [5].

Мелкозернистые кварциты (рис. 2, б) отличаются от суперкварцитов относительной однородностью агрегатов по форме и размерам, они сложены микро- и тонкозернистым кварцем (< 0.1 мм). В обеих разновидностях кварца выявлены включения диккита, алунита, пирита, серицита, а также тонкие прожилки и точки углеродистого вещества в межзерновом пространстве. Флюидные включения (ФВ) в агрегатах кварца суперкварцитов и мелкозернистого кварцита Ока-Уриского блока достигают 18 мкм и распределены преимущественно по секущим трещинам, в межзерновом пространстве и реже внутри агрегатов. Рассчитанные концентрации солей в составе флюида соответствуют: 5.5—5.7 мас. % экв. NaCl — для суперкварцитов и 9.1—9.4 мас. % экв. NaCl — для мелкозернистого кварцита [9].

Сливной кварц (рис. 2, в) отличается от других типов кварцитов размерностью и соотношением зерен. Субпараллельная ориентировка в зернах проявлена слабо. В этой породе реликты мелких зерен кварца (около 25 % породы) заполняют промежутки между крупными и преимущественно гигантозернистыми (> 5 мм) агрегатами кварца, слагающими 75 % породы; отмечаются единичные чешуйки серицита. В сливном кварце наблюдаются ФВ вытянутой трубчатой, вытянутой овальной, столбчатой, неправильной вытянутой, сложной формы. Соотношение двухфазовых (газ—жидкость) и однофазовых (жидкость) ФВ составляет 60/40. Размеры ФВ до 40 мкм. ФВ расположены внутри зерен кварца, реже в межзерновом пространстве. Зерна сливного кварца обладают большей флюидонасыщенностью по сравнению с зернами суперкварцитов. Компонентный состав водно-солевой системы флюида, рассчитанный по температуре эвтектики, соответствует NaCl—KCl—H₂O, CaCl₂—NaCl—H₂O, NaCl—Na₂B₅O₈—H₂O [10]. Отмечаются однофазовые ФВ содержащие только водный раствор. Соленость для системы NaCl—KCl—H₂O составляет 8—10 мас. %.

Крупно-зернистые кварциты северо-восточного участка сложены на 99.5 % агрегатами кварца различной размерности. Размеры зерен варьируются в широком диапазоне от < 0.1 до 1.5 мм. Границы зерен по характеру округлые, раковистые. Второстепенные минералы представлены единичными иголочками серицита.

Кварциты уренгенурского блока (рис. 2, д) являются слабоизмененными исходными породами гарганской кварцитоносной провинции. Они представляют собой

Таблица 1
Содержание основных летучих компонент во флюидных включениях (ppm)

Образец	H ₂ O			CO ₂	CO	C _x H _x	ΣC	H ₂	HCl	H ₂ S	SO ₂
	≤ 600 °C	≥ 600 °C	Всего								
Суперкварцит	58.2	65.7	123.9	2.4	9.4	3.7	7.9	0.2	1.9	0.8	0.2
Мелкозернистый кварцит	77.9	77.0	154.9	4.3	6.9	3.8	7.4	0.3	0.3	0.1	0.04
Сливной кварц	177.7	285	462.7	8.1	19.9	5.8	16.3	0.1	0.8	0.02	0.48
Кварцит северо-восточного участка	54.8	65.0	119.8	4.9	22.0	3.2	13.6	0.1	0.4	0.1	0.1
Кварцит блока Урэнгенур	65.5	75.3	140.8	4.0	9.7	2.4	7.3	0.0	0.3	0.1	0.2
Гранулированный кварц жилы 2821	69.3	38.0	107.3	22	3.6	4.8	11.7	0.1	0.1	0.1	0.1

При мечание. C_xH_x — углеводороды, ΣC — суммарное содержание углерода в углеродсодержащих примесях.

микрозернистые (< 0.01 мм) породы слоистой, реже сланцеватой структуры с примесью карбоната и серицита (до 10 %). При визуальном изучении образцов как в проходящем, так и в отраженном свете под микроскопом ФВ в кварце не обнаружены.

Гранулированный кварц Анахчи-Чипикетской группы жил (рис. 2, e) сложен агрегатами гиганто-, крупно-, средне- и мелкозернистой размерности в соотношении 5/10/70/20 % породы. В качестве примесей встречаются серицит, рутил и окислы железа. В гранулированном кварце ФВ, как правило, каплевидной или округлой формы, распределяются по граням зерен в виде цепочек. Также ФВ находятся внутри зерен, реже наблюдаются в межзерновом пространстве, а также по трещинам. Наиболее крупные ФВ (до 55 мкм) наблюдаются в цепочках и внутри зерен кварца. По составу ФВ являются углекислотно-водными. В двухфазных ФВ присутствует жидкая вода и газообразная CO₂. В трехфазных ФВ, помимо H₂O присутствует CO₂ в двух агрегатных состояниях (жидком и газообразном). Кроме того, встречаются одnofазные газовые ФВ, содержащие плотную CO₂.

Концентрации основных летучих компонентов флюидных включений определяли методом термодесорбционной масс-спектрометрии [4]. Измерения кинетики выхода и состава летучих компонентов выполнены В. А. Крейсбергом в лаборатории кафедры физической химии химфака МГУ. Результаты определения представлены в табл. 1.

Содержание летучих компонентов в кварцевой крупке является важным показателем качества сырья. Наиболее важной характеристикой качества является не общее содержание летучих компонентов, а содержание высокотемпературных форм примесей, которые удаляются в течение длительного времени при термической обработке и определяют прозрачность или пузырчатость получаемого стекла. Вода является основной примесью в кварце, не подвергнутом высокотемпературной термической обработке. Важное значение для получения прозрачного кварцевого стекла играет содержание CO во флюидных включениях. В работе [11] сказано, что если выделение CO превышает критическую величину 15—20 ppm, то при плавлении такого вида сырья возможно появление темных областей в наплавленной стекломассе за счет взаимодействия графитовых включений с матрицей кремнезема и образования монооксида кремния. По содержанию высокотемпературной воды рассматриваемые образцы можно разделить на три группы. К первой группе с содержанием высо-

Таблица 2
Массовые доли примесей в исходных образцах, ppm

Тип кварца	Примеси										
	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10
Суперкварцит	6	27	1.7	0.8	1	0.17	0.02	3.5	6.3	0.13	46.6
Мелкозернистый	7.1	65.9	2.4	4.6	4.4	0.16	0.09	5.9	23.9	0.14	115
Сливной	4.9	10.4	0.3	7.3	0.9	0.2	0.1	19.3	6.2	0.3	50
Кварцит северо-восточного участка	5.08	62.6	1.5	2.7	3	0.06	0.01	4.1	24	0.04	103
Урэнгенур	13.8	234	17.5	186	51	0.1	0.9	6.8	124	0.1	634
Гранулированный кварц жилы 2821	2.9	23.9	1.8	0.3	0.4	0.01	0.01	1.9	4	1.4	37

П р и м е ч а н и е. Технолог О. Н. Соломеин, анализы выполнены В. Ю. Пономаревой.

котемпературной воды менее 40 ppm относится гранулированный кварц жилы 2821 Анахчи-Чипикетской группы. Ко второй группе с содержанием высокотемпературной воды менее 80 ppm относятся суперкварцит и мелкозернистый кварцит месторождения Бурал-Сардык, крупнозернистый кварцит северо-восточного участка Ока-Урикского блока и кварцит Урэнгенурского блока. Сливной кварц юго-западного участка относится к третьей группе. Выделение монооксида углерода из исследованных образцов превышает критическую величину 15 ppm только для образцов сливного кварцита юго-западного участка и крупнозернистого кварцита северо-восточного участка Ока-Урикского блока.

В табл. 2 приведены массовые доли примесей в исходных образцах кварцевого материала. Элементный состав примесей определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой. Методика определения детально описана в работе [5]. Образцы для анализа готовили с применением термодробления в виде кварцевой крупки гранулометрического состава 175—450 мкм. Методика пробоподготовки описана в работе [5]. Из анализа табл. 2 видно, что минимальное содержание примесей содержится в гранулированном кварце, вторую группу составляют суперкварцит и сливной кварц. Третью группу составляют мелкозернистый кварцит месторождения Бурал-Сардык и крупнозернистый северо-восточного участка. К четвертой группе относится кварцит уренгенурского блока.

Результаты и обсуждение. Химическое обогащение (ХО) исходной кварцевой крупки проводили в смеси кислот 20 % HCl : 10 % HF при соотношении жидкого к твердому (Ж/Т) 2 : 1, сушку кварцевой крупки проводили в вакуумном сушильном шкафу при температуре 120 °C. Содержание примесей в кварцевых концентратах всех типов обогащенных образцов кварцевого материала приведено в табл. 3. Из анализа таблицы видно, что наиболее легко обогащается суперкварцит. Следует отметить лишь сравнительно высокую концентрацию натрия, для удаления которого нужны специальные процедуры. Гранулированный кварц жилы 2821, мелкозернистый кварцит месторождения Бурал-Сардык и крупнозернистый образец северо-восточного участка имеют после обогащения суммарное содержание 10 регламентированных примесей порядка 20 ppm, что соответствует характеристикам кварцевых концентратов глубокого обогащения. Существенно отличаются результаты обогащения сливного и уренгенурского образцов. Из сравнения табл. 2 и 3 видно, что при стандартной схеме обогащения в сливном кварце остается практически неизменной

Таблица 3
Массовые доли примесей в кварцевых концентратах после ХО, ppm

Тип кварца	Примеси										
	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10
Суперкварцит	0.9	4.5	0.8	0.7	0.2	0.14	0.005	2.5	0.5	0.12	10.4
Мелкозернистый	0.6	9.3	1.1	1.3	1.3	0.12	0.004	4	2.3	0.14	20.2
Сливной	0.7	7.3	0.4	5.6	0.4	0.2	0.07	20.9	3.6	0.4	40
Кварцит северо-восточного участка	1.6	9.9	0.8	2.1	0.6	0.04	0.004	1.8	2.5	0.02	19.9
Урэнгенур	1.1	12.9	5.1	18.6	2.8	0.1	0.1	2.9	2.6	0.1	46
Гранулированный кварц жилы 2821	0.5	13.6	1.8	0.5	0.1	0.01	0.003	1.5	0.3	1.4	20

Примечание. Технолог О. Н. Соломеин, анализы выполнены В. Ю. Пономаревой.

концентрация натрия. Учитывая то, что этот тип кварцевого материала обладает высоким содержанием высокотемпературной воды, следует предположить, что основная часть натрия находится во флюидных включениях [12]. Для удаления натрия необходимо проводить высокотемпературную прокалку материала для вскрытия флюидных включений. Обогащенный кварцевый концентрат уренгенурского образца характеризуется высоким содержанием кальция и сравнительно высоким содержанием магния. Это связано с тем, что основными минеральными включениями в этом типе материала являются карбонаты. Для удаления карбонатов необходима предварительная обработка кварцевой крупки соляной кислотой, в которой легко растворяются карбонаты. Для проверки этих предположений были проведены следующие процедуры. Кварцевая крупка сливного кварца была прокалена в вакууме при температуре 1450 °C в течение 3 ч и после этого проведена стандартная процедура ХО. Результаты анализа содержания примесей после этих процедур приведены в табл. 4. Как видно из табл. 4, прокалка приводит к резкому уменьшению содержания натрия, а дальнейшее ХО приводит к уменьшению концентрации всех остальных примесей и дает возможность на этом типе материала получить кварцевые концентраты сверхглубокого обогащения. Кварцевую крупку уренгенурского кварцита вначале подвергали травлению в течение 3 ч в соляной кислоте, а затем проводили стандартное обо-

Таблица 4
Массовые доли примесей в кварцевых концентратах после дополнительной обработки и ХО, ppm

Тип кварца	Примеси										
	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10
Суперкварцит*	0.6	3.9	0.6	0.7	0.2	0.03	0.002	2.5	0.5	0.1	9.1
Сливной**	8.9	9.9	0.3	2.9	0.8	0.18	0.07	1.7	1.7	0.4	27
Сливной***	6.9	5.3	0.2	2	0.5	0.11	0.05	1.1	0.9	0.4	17
Урэнгенур****	3.5	11.1	1.8	1.7	1.4	0.08	0.06	2.8	1.9	0.1	24

Примечание. * Двойное термодробление, ХО 20 % HCl : 20 % HF; ** прокаливание кварцевой крупки сливного кварцита проведено в вакууме при температуре 1450 °C в течение 3 ч; *** ХО после прокаливания; **** перед химическим обогащением проведена обработка кварцевой крупки уренгенурского кварцита соляной кислотой в течение 3 ч. (Технолог О. Н. Соломеин, анализы выполнены В. Ю. Пономаревой).

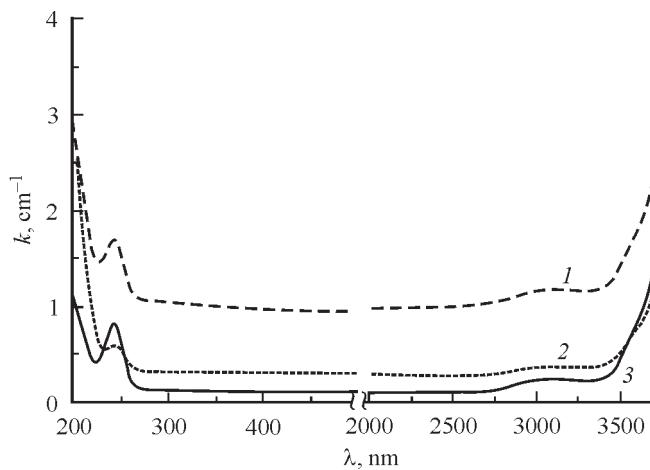


Рис. 3. Спектры поглощения кварцевых стекол из различных типов кварцевых концентратов: 1 (штриховой пунктир) — мелкозернистый кварцит, 2 (точечный пунктир) — гранулированный кварц Чипикет, 3 (сплошная линия) — суперкварцит.

гашение. Результаты по кварцевому концентрату практически идентичны как для уренгойского кварцита, так и для сливного кварца. Для более глубокого обогащения суперкварцита проведено двойное термодробление с использованием деионизированной воды и ХО в смеси кислот 20 % HCl : 20 % HF. В результате был получен концентрат, соответствующий уровню сверхглубокого обогащения.

Из всех типов обогащенных кварцевых концентратов методом вакуумно-компрессионной плавки в графитовых тиглях при давлении 5 бар получены образцы кварцевых стекол. Методика получения кварцевого стекла описана в работе [5]. Спектры поглощения кварцевых стекол приведены на рис. 3. Спектры поглощения прозрачных отполированных плоскопараллельных пластинок из кварцевого стекла толщиной от 1.5 до 3.5 мм измерялись на двухлучевом спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 950 в спектральном диапазоне от 190 до 2500 нм, а в ИК диапазоне от 2500 до 3500 нм измерялись на ИК-Фурье спектрометре Varian Excalibur FTIR. Полученные спектры корректировали на отражение согласно формуле Френеля для нормально падающего луча. Из анализа спектров видно, что все полученные стекла характеризуются высоким светопропусканием в широкой области спектра и соответствуют параметрам так называемого «сухого» стекла марки КИ [13]. В спектрах поглощения полученных образцов в области 2700—2800 нм отсутствует полоса, связанная с поглощением OH групп. Максимальной прозрачностью обладают стекла, полученные на основе кварцевых концентратов из суперкварцитов. Эти концентраты обладают максимальной чистотой (см. табл. 4) и, как следствие, минимальным количеством светорассеивающих мелких пузырей. Подъем фона спектра поглощения для других стекол определяется большей степенью «пузырности». Стекло, полученное из мелкозернистого кварцита имеет максимальное количество газовых пузырей и, как следствие, максимально высокий фон нулевой линии в спектре поглощения. Спектры поглощения стекол, полученных из кварцевых концентратов на основе уренгойского, крупнозернистого кварцита северо-восточного участка и сливного кварца идентичны кривой 2 и поэтому в работе не приводятся. Повышение давления компрессии до 25 бар должно привести к полному удалению газовых пузырей и, следовательно, к понижению нулевой линии спектра поглощения всех типов стекол. Таким образом, представленные в работе разновидности природного кварцевого сырья Восточного Саяна позволяют получать так называемое «сухое» оптическое кварцевое стекло.

Заключение. В работе изучены пять разновидностей кварцитов Восточного Саяна и гранулированный кварц Анахчи-Чипикетской группы жил. Исследуемые образцы существенно отличаются как структурно-текстурными характеристиками, так и минеральными и флюидными включениями. Минимальное содержание высокотемпературной формы воды наблюдается в гранулированном, максимальное в сливном кварце. Минеральные и флюидные включения определяют уровень концентраций примесных элементов в исходном материале. Минимальные содержания примесей (сумма 10 элементов менее 50 ppm) наблюдаются в гранулированном кварце и суперкварците, максимальное в кварцитах блока Уренгенур (более 600 ppm).

Типы минеральных и флюидных включений определяют параметры и схему процессов получения и обогащения кварцевых концентратов. Из всех типов изученного в работе кварцевого сырья получены кварцевые концентраты уровня глубокого обогащения и показана возможность получения кварцевых концентратов сверхглубокого обогащения.

Методом вакуумно-компрессионного наплава в графитовых тиглях из всех типов кварцевых концентратов получено оптическое кварцевое стекло, соответствующее марке КИ.

Экспериментальные результаты, используемые в работе, получены на оборудовании ЦКП «Изотопных и геохимических исследований» ИГХ СО РАН и ЦКП «Байкальский аналитический центр» ИрИХ СО РАН.

Список литературы

1. Серых Н. М., Фролов А. А. Из истории развития отраслевого направления работ на пьезооптическое, кварцевое и камнесамоцветное сырье // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 2—9.
2. 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.
3. Федоров А. М., Макрыгина В. А., Будяк А. Е., Непомнящих А. И. Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарыдаг (Восточный Саян) // ДАН. 2012. Т. 442. № 2 С. 244—249.
4. Федоров А. М., Макрыгина В. А., Непомнящих А. И., Елисеев И. А. Ресурсный потенциал Восточной Сибири на кварцевое сырье для получения высокочистых кварцевых материалов // География и природные ресурсы. 2016. 36. С. 55—59.
5. Непомнящих А. И., Демина Т. В., Жабоедов А. П., Елисеев И. А., Лесников П. А., Лесников А. К., Паклин А. С., Романов В. С., Сапожников А. Н., Сокольникова Ю. В., Федоров А. М., Шалаев А. А., Шендрик Р. Ю. Оптическое кварцевое стекло на основе суперкварцитов Восточного Саяна // Физ. и хим. стекла. 2017. Т. 43. № 3. С. 288—295.
6. Кузьмичев А. Б., Журавлев Д. З., Бибикова Е. В., Кирнозова Т. И. Верхнерифейские (790 млн лет) гранитоиды в тувино-монгольском массиве: свидетельство раннебайкальского орогенеза // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 10. С. 1379—1383.
7. Кузьмичев А. Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: ПРОБЕЛ-2000. 2004. 192 с.
8. Малышев А. Г. Особенности формирования кварцевых жил в Патомском нагорье // Доклады АН. 1987. Т. 292. № 2. С. 430—432.
9. Волкова М. Г., Непомнящих А. И. Результаты микрокриотермометрических исследований флюидных включений в кварцитах месторождения Бурал-Сардык // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 65—69.
10. Борисенко А. С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16—27.
11. Крейсберг В. А., Ракчеев В. П., Серых Н. М., Борисов Л. А. Диагностика газово-жидких примесей в кварце масс-спектрометрическим методом // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 12—18.
12. Махлянова А. М., Брянский Н. В., Непомнящих А. И. Применение лазерной абляции для исследования газово-жидких включений в природном кварце методом масс спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Известия рн. Сер. Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 226—229.
13. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.