

На правах рукописи



Жабоедов Александр Петрович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ
КВАРЦИТОВ ВОСТОЧНОГО САЯНА НА ОСНОВЕ
ХИМИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ**

Специальность

25.00.13 - «Обогащение полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иркутск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения
Российской академии наук

Научный руководитель:	Непомнящих Александр Иосифович , доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук
Официальные оппоненты:	Макаров Дмитрий Викторович , доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольского научного центра Российской академии наук» Рассказова Анна Вадимовна , кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук
Ведущая организация	Институт минералогии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «17» декабря 2021 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.299.08 при ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александровская, 30, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по адресу: 672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129 и на сайте ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по электронному адресу: http://www.zabgu.ru/files/html_document/pdf_files/fixed/Zhaboedov/Dissertaciya_Zhaboedova_A.P._30.09.2021.pdf

Автореферат разослан «15» октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д-р. техн. наук

Г.П. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с развитием наукоемких отраслей потребность в высокочистых концентратах с каждым годом возрастает. По экспертной оценке, в 2021 году мировая потребность в высокочистых кварцевых концентратах будет составлять 117833 тонны при стоимости 8,7 доллара за килограмм, к 2026 году потребность увеличится до 159530 тонн при стоимости 9,1 доллара за килограмм.

В настоящее время монополистом на мировом рынке в области производства особо чистых кварцевых концентратов является компания Unimin (США) - исходным природным сырьём являются пегматиты.

Введение в 2014 г. со стороны Евросоюза и США ограничений на поставку в Россию высокотехнологичной продукции на специализированные предприятия (ОАО "ОНПП Технология", АО "ПНППК", АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", АО "ГУП ЛИСМА" и др.), участвующие в выполнении госзаказов оборонного сектора, жестко, поставило вопрос импортозамещения поставок высококачественного кварцевого стекла. Поэтому вопрос развития технологии получения кварцевых концентратов стоит очень остро.

Единственным производителем кварцевых концентратов в России является ООО «Русский кварц», основное исходное сырьё - гранулированная кварцевая жила №175 уфалейского типа. Истощение традиционных источников кварцевого сырья жильного кварца и горного хрусталя, ставят задачи поиска и исследования новых и перспективных типов кварцевого сырья, развития технологических решений, позволяющих решить проблему дефицита кварцевого сырья в России.

Работы по расширению сырьевой базы для получения особо чистых кварцевых концентратов ведутся различными группами ученых, но объекты исследования практически во всех случаях характеризуются высокой степенью неоднородности и высоким содержанием структурных примесей, ограничивающих степень чистоты получаемых концентратов.

Одним из уникальных и перспективных источников кварцевого сырья являются кварциты Восточного Саяна, для которых характерны высокая чистота, мономинеральный состав и однородность качественных характеристик.

Изучение геохимических характеристик (химический состав, размер и плотность распределения минеральных и флюидных включений, уровень структурных форм основных примесей в силикатном каркасе), полиморфных переходов и химическое обогащение является необходимыми этапами при разработке эффективной технологии получения кварцевого концентрата высокой чистоты.

Научная идея заключается в использовании текстурно-структурных особенностей и связанных с ними закономерностей термического полиморфного превращения кварцитов, обуславливающих удаление флюидных включений и примесей из минеральных зёрен, для определения оптимальных технологических параметров химического обогащения и обоснования критерия, характеризующего глубину процесса извлечения кварца.

Цель диссертационной работы - разработка физико-химических основ технологии получения кварцевых концентратов на основе кварцитов Восточного Саяна для производства оптического кварцевого стекла и термостойкой кварцевой керамики. При выполнении работы решались следующие **задачи**:

1. Выделение продуктивных разновидностей кварцитов на основе изучения их структурно-текстурных особенностей, минеральных, флюидных включений.
2. Изучение полиморфных переходов в кварцитах и их влияние на процессы получения кварцевого концентрата.
3. Обоснование выбора процессов обогащения и разработка технологической схемы, обеспечивающей получение особо чистых кварцевых концентратов, пригодных для получения кварцевого стекла и термостойкой кварцевой керамики.

Объект исследования – природные кварциты Восточного Саяна (кварцитоносные блоки Гарганского района и гранулированный жильный кварц Патомского нагорья).

Предмет исследований – процесс химического обогащения природных кварцитов водными растворами минеральных кислот, процессы термодробления и прокалки для получения особо чистых кварцевых концентратов.

Научная новизна работы:

1. Впервые на основе изучения структурно-текстурных особенностей, минеральных и флюидных включений, индекса кристалличности в кварцитах Восточного Саяна выделены продуктивные разновидности кварцитов.
2. На примере суперкварцитов Ока-Урикского блока показано, что для повышения степени очистки кварцитов необходимо использовать этап термодробления, при температуре полиморфного перехода $\alpha \Leftrightarrow (573) \beta$ -кварц.
3. На примере сливных кварцитов Ока-Урикского блока показано, что флюидные включения не удаляются в процессе дробления и истирания. Для их вскрытия необходима высокотемпературная прокалка.
4. Впервые для кварцитов Восточного Саяна разработаны процессы обогащения, которые учитывают их особенности и специфику, позволяющие получить особо чистые кварцевые концентраты.

Практическая значимость работы.

Разработана технология получения особо чистых кварцевых концентратов из кварцитов Восточного Саяна на основе химического метода обогащения для производства кварцевого стекла и термостойкой кварцевой керамики.

Из полученных кварцевых концентратов синтезированы оптические кварцевые стекла, соответствующие марки КИ.

Разработаны и утверждены технические условия ТУ 5726-001-03533702-2014 «Кварцевые концентраты из природных кварцитов» и технологическая инструкция ТИ-003-2014ИГХ «Изготовление образцов кварцевых концентратов из природного кварцита» для производства высокотемпературной кварцевой керамики.

Методы исследований. Для изучения структурно-текстурных особенностей, минеральных и флюидных включений в кварцевой породе выполнены

петрографические и микрокриотермометрические исследования ФВ на микрокриотермостоліке THMSG-600 («Linkam») с микроскопом BX-51 («Olympus»). Концентрации основных летучих компонентов флюидных включений определяли методом термодесорбционной масс-спектрометрии. Концентрацию элементов примесей определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре NexION 300D (Perkin Elmer, Канада). Для определения фазового состояния и расчета индекса кристалличности использовали рентгеноструктурный анализ, выполненный на порошковом дифрактометре D8 ADVANCE компании Bruker. Индекс кристалличности рассчитывался по методике, описанной в диссертационной работе во второй главе. Синхронный термический анализ выполнен на интегрированном комплексе термического анализа фирмы NETZSCH Geratebau GmbH (Германия). Спектры поглощения полученного кварцевого стекла измерялись на двухлучевом спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 950 и ИК-Фурье спектрометре Varian Excalibur FTIR в спектральном диапазоне от 190 до 3500 нм. Для проведения исследований использовалось оборудование центров коллективного пользования: ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН; ЦКП «Высокотемпературный контур» ИСЭМ СО РАН; ЦКП «Байкальский аналитический центр» ИрИХ СО РАН.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В кварцитах, прошедших термодробление, при полиморфном переходе $\alpha \leftrightarrow \beta$ –кварц снижается не только прочность, но и высвобождается низко- и частично высокотемпературная форма воды, что предопределяет, использование процесса термодробления в технологической схеме обогащения.
2. Для удаления флюидных включений, находящихся внутри кварцевого зерна, необходима высокотемпературная прокалка при температуре начала полиморфного перехода кварц-кристобалит.
3. Типы минеральных, флюидных включений и текстурно-структурные особенности кварцитов определяют параметры процессов для получения кварцевого концентрата.
4. Индекс кристалличности является эффективным критерием для выявления наиболее перспективных типов кварцевого сырья. Кварцевое сырье с наибольшим индексом кристалличности характеризуется наименьшим содержанием примесей в исходной породе и кварцевом концентрате.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в работе, обеспечивается использованием современных методов исследований с применением достоверных и аттестованных методик выполнения измерений, анализом и использованием экспериментальных данных при обосновании выбора процессов обогащения.

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования, организации и участии в исследованиях, направленных на изучение полиморфных переходов, влияния процессов термодробления, отжига, истирания, выбора состава кислот при получении кварцевых концентратов, обработке,

анализе и обобщении полученных результатов, обосновании научных положений и выводов, подготовке публикаций.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на научных конференциях: Современные проблемы геохимии 2013, 2015, 2017, 2021. Иркутск; Байкальский материаловедческий форум 2015, 2018. Улан-Удэ; Всероссийская конференция с международным участием «Месторождения камнесамоцветного и нерудного сырья различных геодинамических обстановок» (XVI Чтения академика А.Н. Заварицкого) 2015. Екатеринбург; Промышленные минералы 2015. Казань; XVII Российское совещание по экспериментальной минералогии 2015. Новосибирск; IX Всероссийская конференция «Керамика и композиционные материалы» 2016. Сыктывкар; Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике 2016, 2018, 2019. Республика Бурятия, с. Аршан, г. Иркутск; Первый Российский Кристаллографический конгресс 2016. Москва; Восьмая международная конференция "Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов", посвященная 150-летию открытия Д.И. Менделеевым периодического закона химических элементов; Третья международная школа молодых ученых "Актуальные проблемы современного материаловедения" 2019. Москва; Третья Российская конференция с международным участием «Стекло: наука и практика» GlasSP2021. Санкт-Петербург.

Публикации. Результаты по теме диссертации представлены в 26 работах, в том числе 10 статей из списка журналов индексируемых в Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 159 страниц, включая 46 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 152 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение отражает актуальность, новизну и практическую значимость работы, её основные цели, задачи и защищаемые положения, приводятся данные по апробации работы.

В первой главе приведён литературный обзор, посвящённый физико-химическим свойствам диоксида кремния, характеристикам полиморфных переходов, основным технологическим требованиям к кварцевому сырью, получению кварцевого концентрата и минерально-сырьевой базе.

При определенных режимах нагрева и необходимом количестве примесей-минерализаторов полиморфные превращения кварца протекают по схеме: α -кварц \Leftrightarrow (573) β -кварц \Leftrightarrow (867) β -триди-мит \Leftrightarrow (1470) β -кристобалит \Leftrightarrow (1727) расплав.

Тридимит не является самостоятельной фазой чистого кремнезёма («чистый кремнезем» - все модификации SiO_2 , содержащие примеси в сумме не более 0,01%), он отсутствует в превращениях, протекающих в системе SiO_2 во всем интервале до 2000°C без минерализаторов или воды.

Технологическая схема получения кварцевого концентрата зависит от геохимических и физико-химических характеристик исходного кварцевого сырья. От геологических условий формирования породы зависят ее текстурно-структурные характеристики, содержание структурных, минеральных и флюидных примесей. В зависимости от данных характеристик производители используют различные процессы и схемы получения кварцевого концентрата.

Все этапы подготовки и обогащения кварцевой породы обусловлены его геохимическими характеристиками: твердые минеральные включения, флюидные включения (ФВ) и структурные примеси. Твердые минеральные включения и флюидные включения можно эффективно удалить (> 99,9%) при помощи физических (термодробление, флотация, отжиг и др.) и химических методов обогащения (обработка кислотами при высокой температуре, хлорирование и др.), структурные примеси практически не извлекаемы.

Вторая глава посвящена объектам и методам исследования.

Объектом исследования являются кварциты Гарганского кварцитоносного района и гранулированный кварц Анахчи-Чипикетского жильного поля Патомского нагорья (жила 2821). В Гарганском кварцитоносном районе изучено три кварцитоносных блока - Уренгенурский, Ока-Урикский и Урда-Гарганский (рис. 1), на которых выделено 7 разновидностей кварцевого сырья (рис. 2).

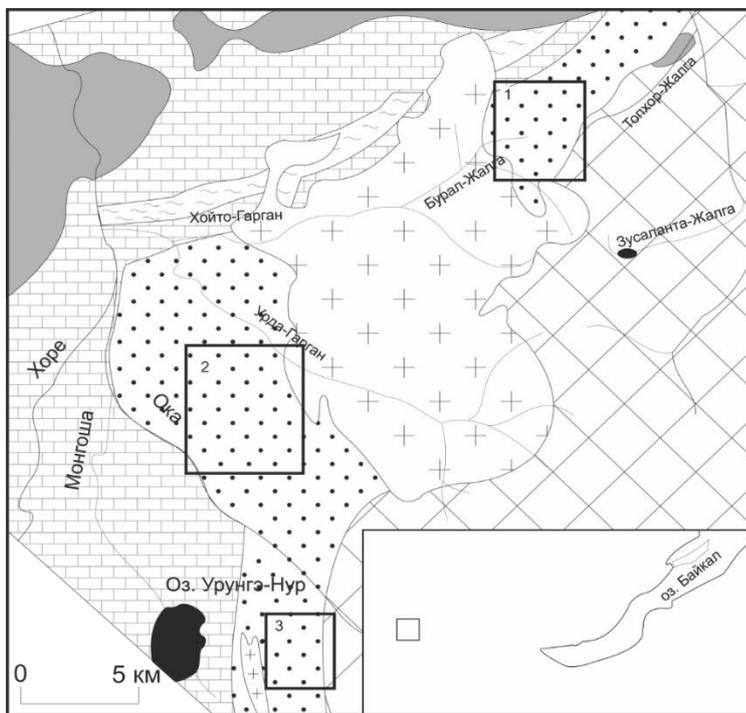
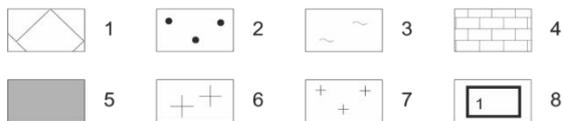


Рисунок 1- Геологическая схема западной части Гарганской глыбы: 1 – фундамент Гарганской глыбы; 2-4 – чехол Гарганской глыбы: 2 – кварциты, 3 – сланцы, 4 – карбонаты; 5 – офиолитовый комплекс нерасчлененный; 6 – гранитоиды сумсунурского комплекса; 7 – гранитоиды мункусардыкского комплекса; 8 – границы кварцитоносных блоков и их номера: 1 – Ока-Урикский, 2 – Урдагарганский, 3 – Уренгенурский



В третьей главе представлены результаты изучения структурно-текстурных особенностей и физико-химические свойства кварцитов Уренге-

нурского, Ока-Урикского, Урда-Гарганского блоков Гарганского кварцитового района и образцов гранулированного кварца жилы 2821 Анахчи-Чипикетского месторождения. Полученные экспериментальные данные обосновывают выбор процессов обогащения и технологическую схему, для получения особо чистых кварцевых концентратов.

Кварциты уренгенурского блока являются слабоизмененными исходными породами Гарганской кварцитоносной провинции (рис. 1, рис. 2а). Они представляют собой микрозернистые ($<0,01$ мм) породы слоистой, реже сланцеватой структуры с примесью карбоната и серицита до 10%. При визуальном изучении препаратов как в проходящем, так и в отраженном свете под микроскопом ФВ в кварце не обнаружены.

В пределах Ока-Урикского блока выделено и изучено четыре разновидности кварцевого сырья: суперкварциты, мелкозернистые, сливные и порфиоровидные кварциты (рис. 1, рис. 2б, в, г, д).

Суперкварциты. Высокочистые разновидности кварцитов Ока-Урикского блока, названные ранее «суперкварциты». Данный тип сырья, характеризуются мономинеральным кварцевым составом (99,9% породы). Матричный материал кварцевой породы представлен агрегатами кварцевых зерен размером 0,1-0,4мм. В мелкозернистых агрегатах расположены крупные зерна кварца (1,5-2,0 x 3-4 мм), с субпаралельной ориентировкой относительно друг друга (рис. 2б).

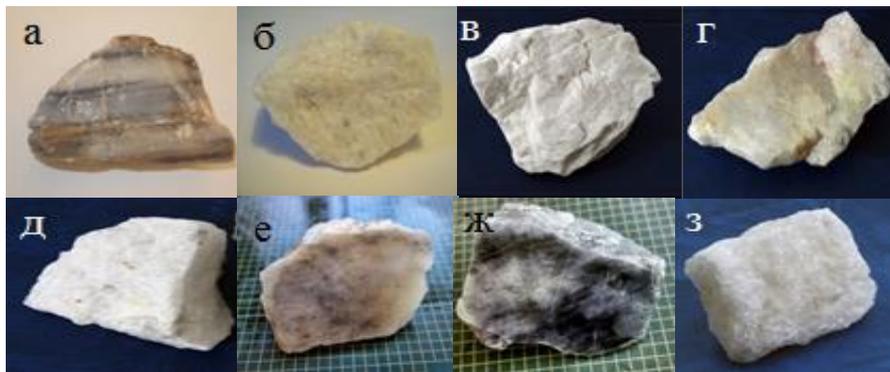


Рисунок 2 Образцы кварцевого материала: а- кварциты участка Уренгенур, б- суперкварциты, в-мелкозернистый кварцит, г-сливной кварц, д-порфиоровидный кварцит, е –кварциты Урда-Гарганского участка первая разновидность (осветленный), ж- кварциты Урда-Гарганского участка вторая разновидность (углистые), з-гранулированный кварц Анахчи-Чипикетской группы жил.

Мелкозернистые кварциты отличаются от суперкварцитов относительной однородностью агрегатов по форме и размерам (рис. 2в), они сложены микро- и тонкозернистым кварцем ($<0,1$ мм). В обеих разновидностях кварца (суперкварцит и мелкозернистый кварцит) выявлены включения диккита, алуниита, пирита, серицита, а также тонкие прожилки и точки углеродистого вещества в межзерновом пространстве. Флюидные включения (ФВ) в агрегатах кварца суперкварцитов и мелкозернистого кварцита Ока-Урикского блока достигают 18 мкм и распределены преимущественно по секущим трещинам, в межзерновом пространстве и реже внутри агрегатов. Встречаются ФВ уплощенные изомет-

ричной, округлой формы и сложной морфологии. Рассчитанные концентрации солей в составе флюида соответствует: 5,5-5,7 мас. % экв. NaCl - для суперкварцитов и 9,1-9,4 мас. % экв. NaCl - для мелкозернистого кварцита.

Сливной кварцит Ока-Урикского участка отличается от других типов кварцитов размерностью и соотношением зерен (рис. 2г). Матричный материал представлен крупными и гигантозернистыми кварцевыми агрегатами размером более 5 мм, и составляющими 75% породы. Остальная часть породы представлена реликтами мелких зерен кварца (25%). В трещинах и межзерновом пространстве встречаются единичные чешуйки серицита. Сливные кварциты отличаются большей флюидонасыщенностью, по сравнению с другими кварцитами данного блока, и характером расположения флюидных включений. Если в вышеописанных кварцитах ФВ располагались, преимущественно, в трещинах и межзерновом пространстве, то в сливных кварцитах ФВ находятся внутри кварцевого зерна. Размеры ФВ до 40 мкм. Компонентный состав водно-солевой системы флюида, рассчитанный по температуре эвтектики, соответствует NaCl-H₂O. Рассчитанная соленость для NaCl-H₂O составляет 8-10 мас. %.

Порфиroidные кварциты сложены на 99.5 % агрегатами кварца различной размерности (рис. 2д), характеризуются наличием крупных кварцевых порфиров, имеющих субпараллельную ориентировку относительно друг друга. Примесные минералы представлены единичными иголочками серицита. ФВ в порфиroidных кварцитах ничем не отличаются от ФВ в суперкварцитах.

Первая разновидность кварцитов Урда-Гарганского блока характеризуется массивной микротекстурой (рис. 1, рис. 2е). Новообразованные крупно- и гиганобластовые кварцевые агрегаты II генерации (Q II) заключены в реликтах крупных агрегатов кварца I генерации (Q I). Порода сложена агрегатами кварца 99,9-99,5%. Минеральные примеси представлены иголочками и чешуйками серицита, размером менее 1мм, распределенными по образцу неравномерно, находящимися в трещинах, пересекающих породу.

Вторая разновидность кварцитов Урда-Гарганского блока характеризуется слоистой, слоисто-пятнистой и пятнистой текстурой (рис. 1, рис. 2ж). В образцах чередуются полосы серого цвета различной интенсивности с частицами углистого вещества и серовато-белого цвета с меньшим количеством углистого вещества. Ширина полос изменяется в широких пределах. В срезах в крест плоскостей развития углистого вещества, полосы имеют расплывчатые границы и переходят в "пятна". При наибольшем количестве углеродистого вещества порода приобретает почти чёрный цвет, содержание углеродистого вещества колеблется в пределах <0,5 до 1% и более. Минеральные включения представлены чешуйками серицита (1-2%). ФВ в кварцитах Урда-Гарганского блока представлены преимущественно двухфазными включениями. Объем газового пузыря не превышает 40% объема вакуоли, чаще составляет от 10 до 20% вакуоли. Полная гомогенизация в двухфазовых ФВ отмечалась не всегда. Во всех ФВ наблюдалось сужение газового пузыря при нагреве выше 150 °С. Измеренная температура полной гомогенизации ФВ в жидкость составляет: в одних ФВ от 170 до 175 °С, в других ФВ - от 350 до 390 °С. Температура плавления льда

изменяется в пределах от -9,2 до -7,9 °С. Размер включений достигает 20-43 мкм. Чаще всего ФВ расположены в трещинах и межзерновом пространстве, но встречаются цепочки, которые простираются сразу через несколько зерен. Солевая составляющая в NaCl-H₂O рассчитана и составляет 12-13 мас. % экв. NaCl.

Гранулированный кварц Анахчи-Чипикетской группы жил сложен агрегатами гиганто-, крупно-, средне- и мелкозернистой размерности в соотношении 5/10/70/20 % породы (рис. 2з). Примесные минеральные включения представлены серицитом, рутилом и окислами железа. ФВ расположены внутри зерен, реже наблюдаются в межзерновом пространстве и трещинах. Состав ФВ углекислотно-водные двухфазовые ФВ - жидкая вода и газообразная CO₂; углекислотно-водные трёхфазовые, где CO₂ присутствует в двух агрегатных состояниях, существенно газовые (однофазовые), содержащие плотную CO₂.

Элементный состав и индекс кристалличности исходных образцов

Характеристики элементов примесей и индекса кристалличности в исходных образцах представлены в табл. 1 и на рис. 3. Индекс кристалличности - характеристика дефектности кристаллического строения. Как видно из рис. 3, наиболее перспективным сырьем, по содержанию исходных примесей и показателем индекса кристалличности, являются суперкварцит, гранулированный кварц и сливной кварцит. Сравнивая их, можно отметить, что особенностью сливного кварцита является низкое содержание алюминия, но более высокое содержание натрия. При сравнимой сумме примесей основным отличием данных разновидностей кварцитов является величина индекса кристалличности. В мелкозернистом, порфириновидном кварцитах Ока-Урикского блока и кварцитах Урда-Гарганского блока, основными примесями является алюминий и калий. Наибольшая концентрация примесей наблюдается в кварцитах Уренгенурского блока, концентрация таких примесей как алюминий, титан, кальций, магний, калий на порядок выше, чем концентрация примесей в гранулированном кварце.

Таблица 1 - Массовые доли примесей в исходных образцах, ppm

Тип кварца	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li
Суперкварцит	6	27	1,7	0,8	1	0,17	0,02	3,5	6,3	0,13
Мелкозернистый	7,1	65,9	2,4	4,6	4,4	0,16	0,09	5,9	23,9	0,14
Сливной	4,9	10,4	0,3	7,3	0,9	0,2	0,1	19,3	6,2	0,3
Порфириновидный	5,08	62,6	1,5	2,7	3	0,06	0,01	4,1	24	0,04
Уренгенур	13,8	234	17,5	186	51	0,1	0,9	6,8	124	0,1
Урда-Гарган первый тип	17	59	3,2	20	10	0,3	0,9	6	22	0,1
Урда-Гарган второй тип	29	84	3,6	6,7	6,4	0,2	0,9	6,5	34	0,1
Гранулированный кварц жилы 2821	2,9	23,9	1,8	0,3	0,4	0,01	0,01	1,9	4	1,4

В табл. 2 приведены результаты термодесорбционного исследования масс-спектрометрическим методом, при ступенчатом нагреве до 1400⁰С. По результатам компьютерного разделения и поправки на частичное перекрытие

разных форм воды. Вода, выделившаяся до 600 °С, считалась низкотемпературной, свыше 600 °С высокотемпературной.

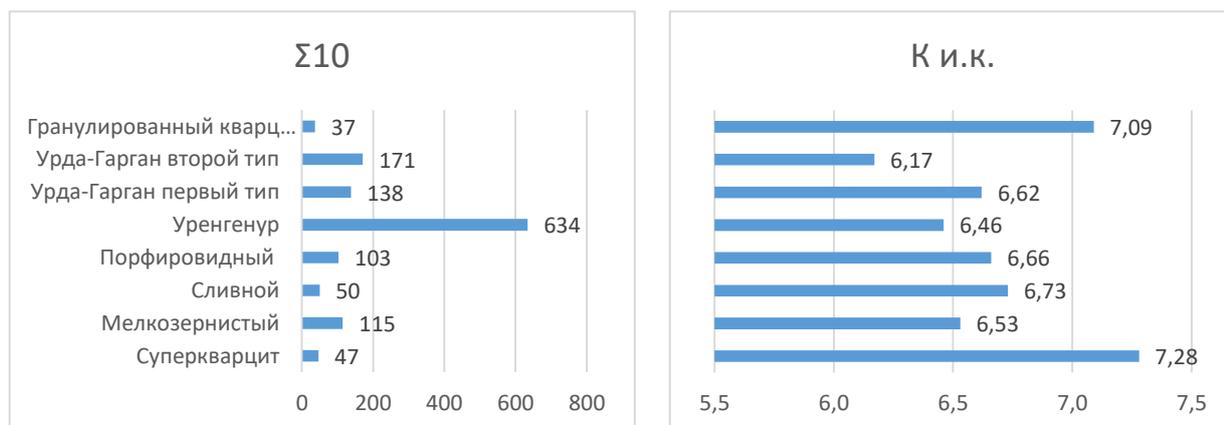


Рисунок 3- Содержание примесей (ppm.) и величина индекса кристалличности в исходных образцах кварца

По содержанию высокотемпературной воды наиболее перспективным сырьем является гранулированный жильный кварц с содержанием 38,7 ppm, относящийся к первой группе. Суперкварцит и мелкозернистый кварцит месторождения Бурал-Сардык, порфиroidный кварцит северо-восточного участка Ока-Урикского блока и кварцит Урэнгенурского блока относятся ко второй группе, с содержанием высокотемпературных форм воды от 65 до 80 ppm. К четвертой группе относятся сливные кварциты Ока-Урикского блока, содержащие 288 ppm воды. Следует отметить, что при производстве кварцевого стекла учитывается содержание высокотемпературных форм воды в кварцевых концентратах, а не в исходных породах. Несмотря на это большинство кварцитов Ока-Урикского блока по данному критерию показали потенциал их промышленной переработки.

Таблица 2- Содержание основных летучих компонентов в образцах (ppm)

Образец	H ₂ O			CO ₂	CO	C _x H _x	ΣC
	600°C VI	600°C ΔI	Всего				
Суперкварцит	58	66	124	2	9	4	8
Мелкозернистый	78	77	155	4	7	4	7
Сливной	178	285	463	8	20	6	16
Порфиroidный	55	65	120	5	22	3	14
Кварцит блока Уренгенур	65	75	141	4	10	2	7
Гранулированный кварц жилы 2821	69	38	107	22	4	5	12

Примечания: C_xH_x – углеводороды, ΣC – суммарное содержание углерода в углеродсодержащих примесях. Измерения кинетики выхода и состава летучих компонентов выполнены В. А. Крейсбергом в лаборатории кафедры физической химии химфака МГУ.

Полиморфные переходы в кварцитах

Поскольку кварциты Ока-Урикского блока являются мономинеральной породой, состоящей на 99,95 % из кварца, при полиморфных переходах они не образуют фазу тридимита.

Первым фазовым переходом, наблюдаемым в кварцитах Ока-Урикского участка, является α – кварц \leftrightarrow β – кварц. Температура фазового перехода определена при помощи синхронного термического анализа и составляет 573°C. Температура и скорость перехода не зависят от чистоты материала. Результаты представлены на рис. 4. Переход $\alpha \leftrightarrow \beta$ – кварц взят за основу при этапе термодробления кварца. По результатам количественного исследования основных летучих компонентов флюидных включений масс-спектрометрическим методом в суперкварцитах можно сделать вывод, что процесс термодробления способствует не только снижению прочностных характеристик материала, но и высвобождает низко и высокотемпературную формы воды (см. табл. 3.)

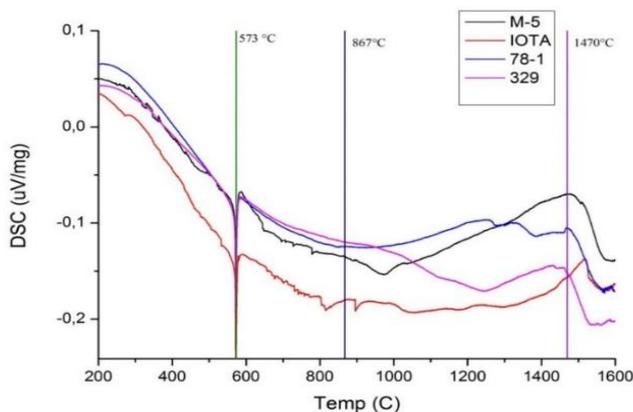


Рисунок 4- Результаты синхронного термического анализа. Образцы: М-5- мелкозернистый кварцит, IOTA- кварцевый концентрат фирмы Юнимин, 78-1- суперкварцит, 329- сливной кварцит.

В кварцитах прошедшие термодробление при переходе $\alpha \leftrightarrow \beta$ – кварц, снизилась концентрация низкотемпературной воды в 6 раз, а концентрация высокотемпературной в 2,3 раза.

Таблица 3 - Содержание основных летучих компонентов в образцах, ppm

Образец	H ₂ O			CO ₂	CO	C _x H _x	ΣC
	<600° C	^ 600°C	Всего				
Суперкварцит 78/1	58,2	65,7	123,9	2,4	9,4	3,7	7,9
Суперкварцит 80/1	11,1	27,8	38,9	1,3	3,6	3,0	4,5
Суперкварцит 116/1	42	3,9	45,9	0,4	4,4	4,8	6,2
Iota-standart фирмы «Unimin»	18,6	17,2	35,8	1,3	4,5	3,9	5,7

Примечание: C_xH_x – углеводороды, ΣC – суммарное содержание углерода в углеродсодержащих примесях. 78/1-крупка 174-450 мкм, полученная из суперкварцита без стадии термодробления. 80/1-крупка 174-450 мкм, полученная из суперкварцита со стадией термодробления. 116/1- крупка 174-450 мкм, полученная из суперкварцита со стадией термодробления, дополнительная высокотемпературная прокалка при температуре 1455⁰C, содержание кристобалита – 91%.

Из полученных данных следует первое защищаемое положение:

В кварцитах, прошедших термодробление при полиморфном переходе $\alpha \leftrightarrow \beta$ – кварц, снижается не только прочность, но и высвобождается низко- и частично высокотемпературная форма воды, что предопределяет, использование процесса термодробления в технологической схеме обогащения.

Вторым полиморфным переходом в кварцитах Ока-Урикского блока является переход кварц - кристобалит, который начинается при температуре 1450°C. Во время данного перехода, происходит увеличение удельного объема (около 8%) за счет увеличения структурных каналов. Из-за увеличения структурных каналов и межзернового пространства происходит вскрытие флюидных включений. Влияние данного перехода на вскрытие и удаление высокотемпературных форм примесей показано в табл. 3. Как видно из табл. 3, по содержанию «высокотемпературной» воды кристобалитизированный образец суперкварцита 116/1 превосходит эталонные образцы кварца фирмы Юнимин. Наличие значительного количества «низкотемпературной» воды связано с высокими сорбционными свойствами кварцита, прошедшего кристобалитизацию. Микропористая морфология поверхности и ярко выраженные геттерные свойства этого образца, возникшие после жесткого термического воздействия и, приводящие к адсорбции паров воды и органических веществ из окружающей атмосферы, требует повышения чистоты окружающего пространства при хранении и транспортировке кварцевых концентратов, подвергнутых термическим режимам обогащения (см. табл. 3. суперкварцита 116/1).

В четвертой главе представлены результаты получения кварцевого концентрата и свойств наплавленного кварцевого стекла.

Хотя кварцевые породы широко распространены, месторождения высокочистого кварцевого сырья относительно редки, а месторождения высокочистых кварцитов вообще являются уникальными. При исследовании геохимических характеристик кварцитов Восточного Саяна, установлено, что практически все породы являются мономинеральными и более чем на 99% сложены агрегатами кварца. При разработке этапов получения кварцевого концентрата из данного типа сырья, процесс флотации исключен.

Одним из основных процессов, используемых при получении кварцевых концентратов, являлся этап химического обогащения кварцевой крупки. Поскольку от характеристик применяемых растворов (состав, температура и время обработки) зависит степень очистки. Оценка эффективности удаления примесей минеральными кислотами выполнялась на мелкозернистом кварците. По результатам исследования построены зависимости содержания примесей от состава применяемых растворов минеральных кислот (рис. 5.).

Из анализа данных рис. 5 следует, что для эффективного удаления примесных элементов, реакционные смеси кислот должны содержать плавиковую кислоту. Без ее использования концентрация основных примесных элементов (алюминий и калий) практически не снижается. Использование HF в реакцион-

ных смесях позволяет снизить концентрацию алюминия в 7, калия в 10 раз, а общее содержание примесей в 5 раз.

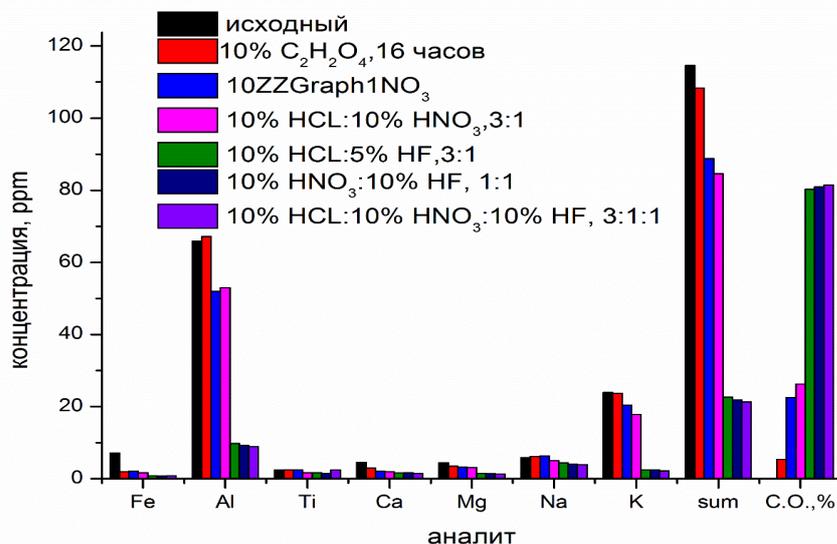


Рисунок 5 - Зависимость содержания примесей в кварцевых концентратах от состава растворов кислот при химическом обогащении

После того, как были выявлены наиболее эффективные реакционные растворы минеральных кислот, проведены работы по оценке влияния термообработки крупки на степень очистки суперкварцитов при химическом обогащении. Зависимости степени очистки представлены на рис. 6.

Из анализа данных рис. 6 видно, что без предварительной термообработки куски содержание примесей при химическом обогащении минеральными кислотами снижается до суммы примесей 18,9 ppm (проба 105), а этап термодробления куски с последующим химическим обогащением позволяет снизить сумму 10 примесей до 10,1 ppm (проба 106). Отмечено, что в процессе прокалики происходит незначительное увеличение суммы примесей, с 10 до 13 ppm (проба 106,109), в основном, за счет увеличения массовых долей железа, алюминия, кальция, калия и лития. Высокотемпературная прокалика при температуре 1450 °С, с последующим обогащением в растворе кислот, позволила снизить концентрацию Na более чем в десять раз. Это было достигнуто, по всей видимости, за счет вскрытия флюидных включений и удаления образовавшихся солей с поверхности и межзеренного пространства кварца, а сумма примесей была снижена до 7,17 ppm (проба 107).

Прокалика, проведенная перед химическим обогащением, приводит к значительному увеличению концентрации Al, пробы 104к/2 и 104к/21 рис. 6. Это связано с переходом Al в кристаллическую решетку кварца, что подтверждается результатами исследования ЭПР табл. 4. Как видно из табл. 4 при высокотемпературной обработке концентрация структурного алюминия увеличивается более чем в два раза.

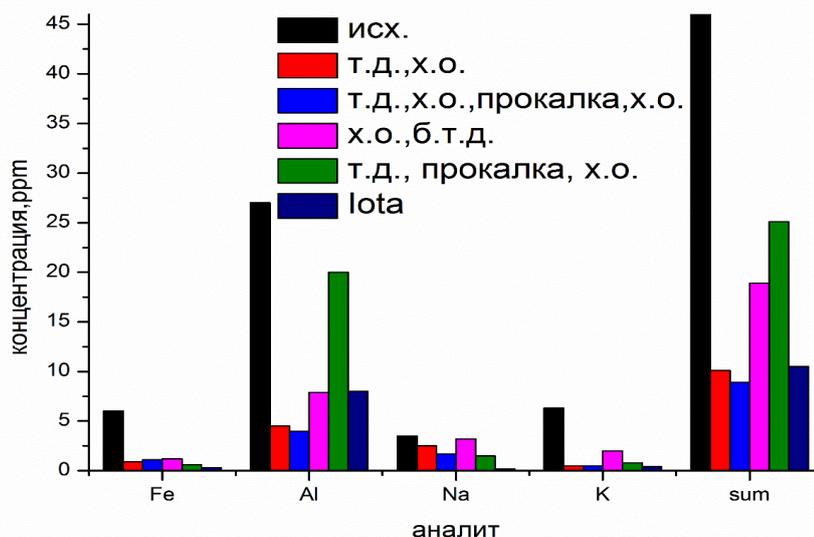


Рисунок 6 - Влияние термообработки на степень очистки при химическом обогащении суперкварцита. Примечания: ЮТА-4- кварцевый концентрат фирмы Sibelco U.S.A.

Таблица 4- Содержание алюминия в образцах кварца после облучения электронами 2,4 МэВ с дозой 10 MRad

Образец	P, g	Area	C _{Al} , у.е.	Amplitude	[Al] Ampl
1	0,155	16323	5,1	4458	6,9
2	0,165	37424	11,8	9691	15

Примечания: 1- исходная крупка суперкварцита, фракция 100-300 мкм; 2-проба 1 после прокали 1400 °С, 4 часа.

В результате проведения лабораторных исследований, разработана принципиальная технологическая схема получения особо чистого кварцевого концентрата, представленная на рис. 7. Схема включает следующие процессы: дробление кварцевого куска с последующим грохочением и выделением рабочей фракции 3-10 мм; промывка куска в дезинтеграторе для удаления остатков глины, чтобы уменьшить расход кислот; химическое травление куска HCl-10%, для удаления натиров железа и окислов с поверхности куска, с последующей нейтрализацией; сушка куска; термодробление; измельчение; классификация крупки до фракции +100 –300 мкм; химическое обогащение 20% HCl:10%HF Ж/Т=2:1; сушка кварцевой крупки; контроль качества кварцевого концентрата; упаковка.

По «Принципиальной технологической схеме» получены кварцевые концентраты из всех, описываемых в работе, типов кварцевого материала. Результаты обогащения представлены на рис. 8. Из анализа данных видно, что при использовании базовой схемы обогащения, из гранулированного жильного кварца, мелкозернистого и порфириовидного кварцитов получены кварцевые концентраты с суммарным содержанием 10 регламентирующих примесей по-

рядка 20 ppm, что соответствует характеристикам кварцевых концентратов глубокого обогащения.

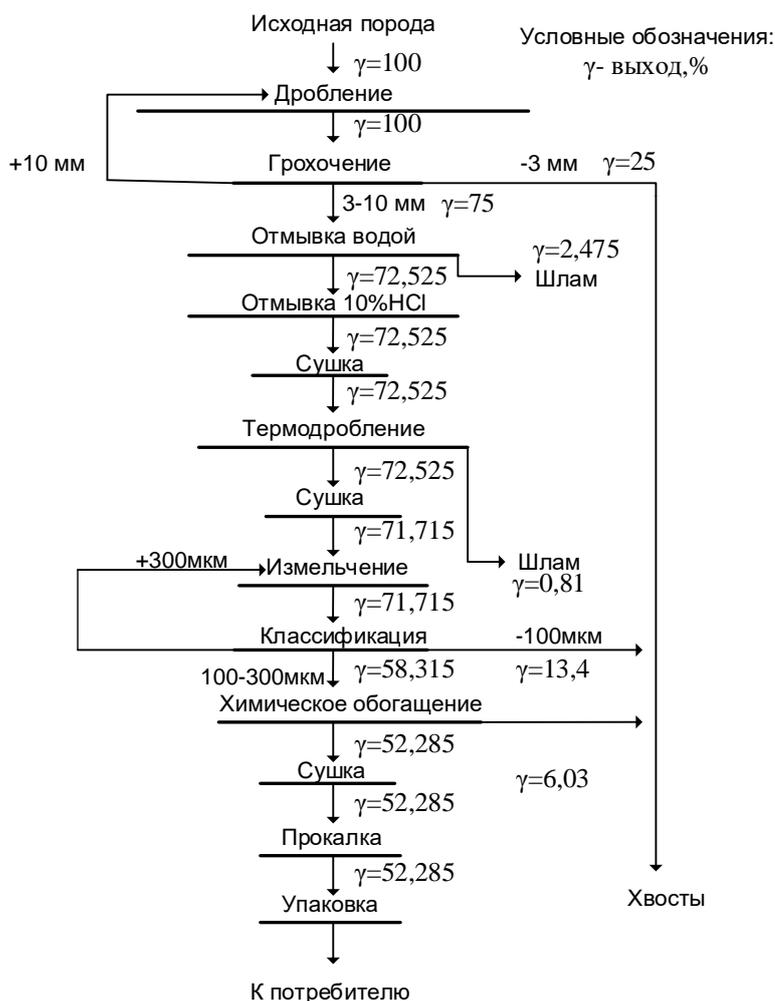


Рисунок 7- Принципиальная схема получения кварцевых концентратов

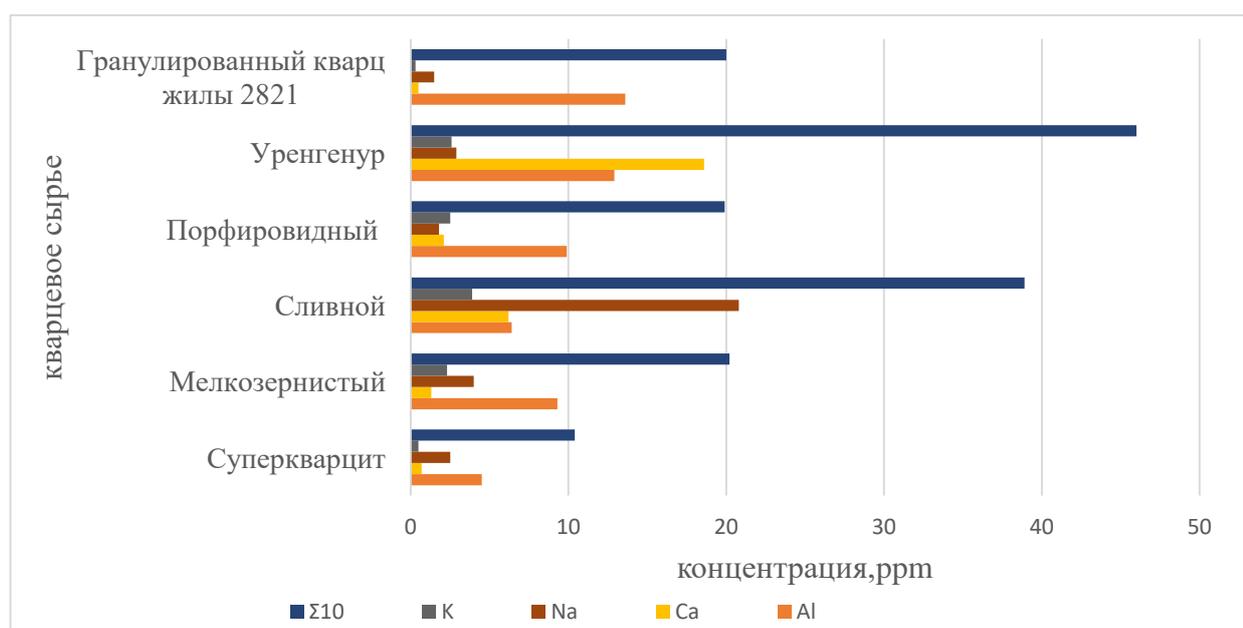


Рисунок 8-Содержание примесей в кварцевых концентратах, полученных по «Принципиальной схеме», ppm

Исключением являются сливные кварциты Ока-Урикского блока. Учитывая то, что по результатам петрографических исследований установлено, что в данном типе кварцевого материала основная часть флюидных включений расположена внутри кварцевых агрегатов можно предположить, что химическое обогащение в смесях кислот не способствует удалению натрия. Для его удаления требуется декрипитация ФВ. Вероятнее всего этому будет способствовать высокотемпературная прокалка при температуре начала полиморфного перехода кварц кристобалит. Для проверки этого предположения кварцевая крупка сливного кварцита была прокалена при температуре 1450 °С, время выдержки составило три часа. После чего была выполнена стандартная процедура ХО. Результаты анализа содержания примесей после этих процедур приведены в табл. 5. Из анализа данных табл. 1,2 и 5 видно, что для удаления летучих компонент, декрипитации флюидных включений, необходима высокотемпературная прокалка для эффективного удаления натрия, а дальнейшее ХО позволяет снизить содержание элементов примеси до 17 ppm и дает возможность на этом типе материала получить кварцевые концентраты глубокого обогащения.

При анализе данных табл. 1 видно, что концентрация примесей в исходных образцах кварцитов Уренгенурского блока практически на порядок выше всех других исследуемых образцов. Основную часть данных примесей составляют минеральные включения карбонатов. Вероятнее всего при обогащении по базовой схеме (рис. 7) не удастся эффективно удалить все карбонатные включения. Поскольку карбонаты эффективно растворяются в соляной кислоте, дополнительно применен этап травления кварцевой крупки в соляной кислоте, перед стандартным этапом химического обогащения в смесях кислот соляной и плавиковой. Результат обогащения показан в табл. 5. При сравнении рис. 8 и табл. 5, отмечено, что введение дополнительного этапа травления кварцевой крупки в соляной кислоте позволило эффективно растворить карбонатную составляющую и снизить концентрацию кальция в десять раз. Из полученных данных следует необходимость использования этапа травления в соляной кислоте при получении кварцевых концентратов из кварцитов Уренгенурского блока.

Таблица 5 - Массовые доли примесей в кварцевых концентратах после дополнительной обработки и ХО, ppm

Тип кварца	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10	К и.к.
Сливной*	8,9	9,9	0,3	2,9	0,8	0,18	0,07	1,7	1,7	0,4	27	6,73
Сливной**	6,9	5,3	0,2	2	0,5	0,11	0,05	1,1	0,9	0,4	17	6,73
Уренгенур***	3,5	11,1	1,8	1,7	1,4	0,08	0,06	2,8	1,9	0,1	24	6,46

Примечания: * Прокалка кварцевой крупки сливного кварцита проведена в вакууме при температуре 1450⁰С в течении трех часов; **ХО после прокалки; ***Перед химическим обогащением проведена обработка кварцевой крупки Уренгенурского кварцита соляной кислотой в течении трех часов.

Обогащение кварцитов Урда-Гарганского участка проводилось по базовой схеме. Результаты обогащения представлены на рис. 9-10.

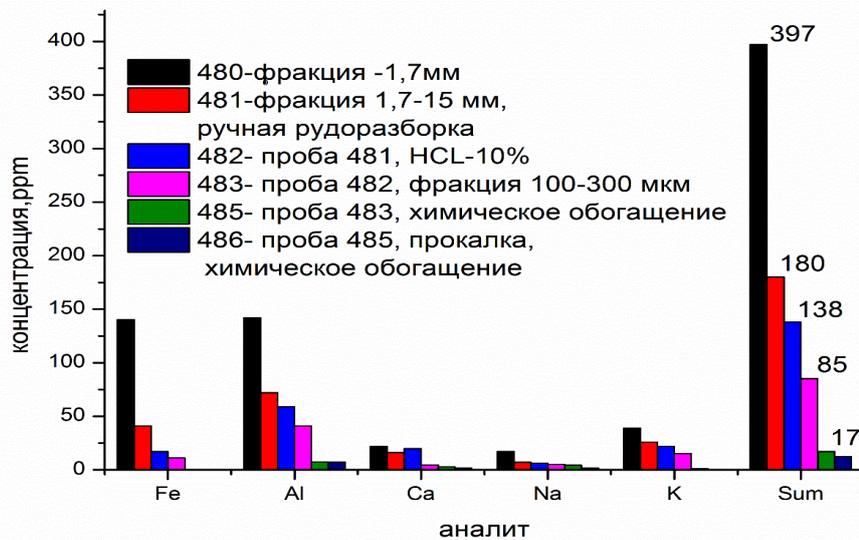


Рисунок 9 - Результат химического обогащения кварцитов первого типа

По результатам обогащения первой разновидности сливных кварцитов месторождения Семерка Урда-Гарганского блока можно предположить, что основная часть минеральных примесей находится в трещинах и межзерновом пространстве, т.к. при дроблении, грохочении, истирании и выделении фракции 100-300 мкм наблюдается существенное снижение концентрации примесей (см. рис.9 пробы 480,481,482,483). Так, например, концентрация железа в отсеке (проба 480) больше концентрации в рабочей фракции (проба 483) в 14 раз, содержание алюминия снижается со 142 ppm до 41 ppm, содержание других примесных элементов снижается в два и более раза. Дальнейшее химическое обогащение позволяет получать кварцевые концентраты по своим характеристикам соответствующим кварцевым концентратам глубокого обогащения с содержанием по десяти нормирующим примесям на уровне 17 ppm (проба 485). Необходимо отметить, что как в сливных кварцитах Ока-Урикского блока, химическое обогащение практически не снизило концентрацию примеси Na. В данной разновидности кварцитов, также, как и в сливных кварцитах, флюидные включения расположены преимущественно внутри кварцевого зерна и для их вскрытия необходима высокотемпературная обработка. Результаты пробы 486 подтверждают, что дополнительная прокалка при температуре 1450 °C с повторным химическим обогащением позволила снизить концентрацию Na в четыре, а K в три раза.

При обогащении сливных кварцитов второй разновидности по базовой схеме были получены кварцевые концентраты, соответствующие показателям кварцевых концентратов глубокого обогащения с содержанием 23ppm примесей по десяти регламентирующим (рис. 10, пробы 520 и 524). Однако при дроблении, истирании и классификации не наблюдается существенное снижению

концентрации минеральных примесей. Кроме того, полученные кварцевые концентраты, даже после химического обогащения, сохранили цвет исходной породы и остались серыми, а высокотемпературная прокалка не способствовала снижению концентрации натрия. Учитывая данный факт, пробы 517 и 524 проанализированы на количественное содержание углерода на элементном анализаторе Flash EA 1112 CHNS. Результаты анализа приведены в табл. 6.

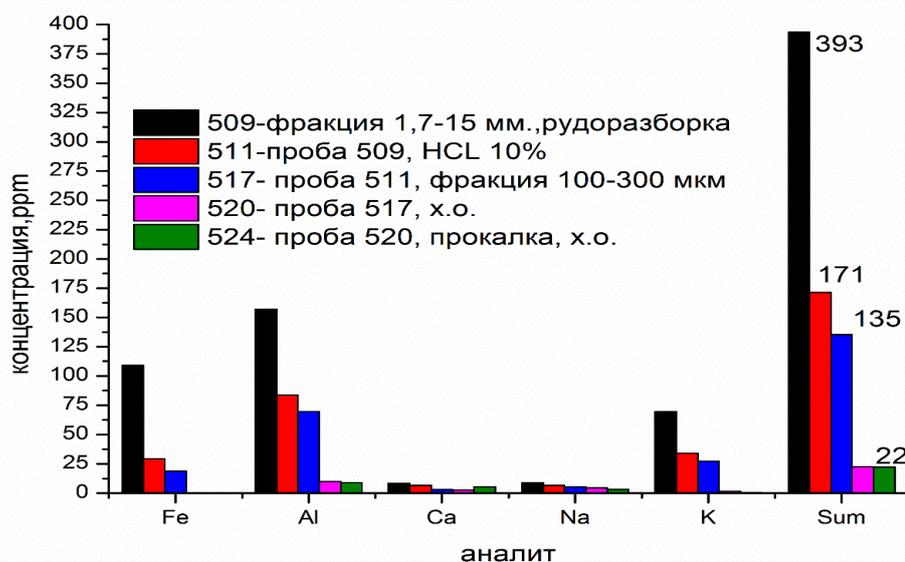


Рисунок 10 - Результат химического обогащения кварцитов второго типа

На основании анализа данных рис. 9,10 можно сделать вывод, что вторая разновидность сливных кварцитов отличается от первой достаточно высоким содержанием углеродистого вещества, которое не удаляется при дроблении, истирании, классификации и высокотемпературной прокалке, и вероятно именно оно является абсорбентом минеральных примесей.

Таблица 6 -Содержание углистого вещества в кварцитах 2-й разновидности, %

Проба	С	Зола
517	0,61	97,52
524	0,65	98,75

Проанализировав результаты обогащения кварцитов Восточного Саяна, сформулированы второе и третье защищаемые положения:

Для удаления флюидных включений, находящихся внутри кварцевого зерна, необходима высокотемпературная прокалка при температуре начала полиморфного перехода кварц-кristобалит.

Типы минеральных, флюидных включений и текстурно-структурные особенности кварцитов определяют параметры процессов для получения кварцевого концентрата.

При сравнении величины индекса кристалличности с суммарным количеством примесей в исходном сырье и полученных концентратах прослеживается

следующая зависимость. Чем выше индекс кристалличности, тем меньше сумма примесей в полученных концентратах (см. табл. 1,5 рис.3,8,9,10). Самый высокий индекс кристалличности у суперкварцитов. На основе суперкварцитов получены кварцевые концентраты с минимальным содержанием примесей в пределах Гарганской кварцевой провинции. Сравнивая результаты обогащения кварцитов Уренгенурского участка (см. табл.1,5 рис.11), можно отметить, что, несмотря на высокое содержание примесей в исходной породе, кварциты имеют высокий индекс кристалличности и эффективно обогащаются.

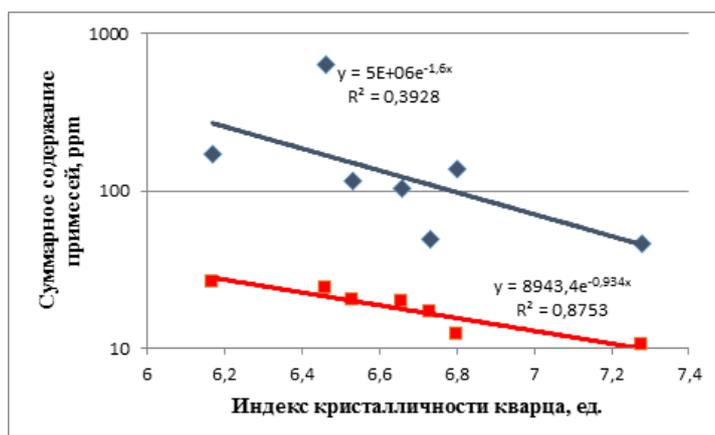


Рисунок 11. Зависимость между индексом кристалличности кварца и содержанием примесей в исходном сырье (синее) и концентрате (красное).

Известная обратная связь между индексом кристалличности (совершенством кристаллического строения) жильного кварца и содержанием в нем элементов-примесей (Юргенсон, 1997) установлена также и для получаемых кварцевых концентратов и может быть использована для оценки качества кварцевого сырья.

Из этого следует четвертое защищаемое положение.

Индекс кристалличности является эффективным критерием для выявления наиболее перспективных типов кварцевого сырья. Кварцевое сырье с наибольшим индексом кристалличности характеризуется наименьшим содержанием примесей в исходной породе и кварцевом концентрате.

Из полученных кварцевых концентратов произведён наплав стёкол. Анализ стекол показал, что они соответствуют «сухому» кварцевому стеклу марки КИ. При исследовании кристаллизации установлено, что синтезированные стекла являются термостойкими и характеризуются низкой кристаллизационной активностью.

Полученные в работе результаты по обогащению кварцитов Восточного Саяна, легли в основу разработки технических условий ТУ 5726-001-03533702-2014 «Кварцевые концентраты из природных кварцитов» и технологической инструкции ТИ-003-2014 ИГХ «Изготовление образцов кварцевых концентратов из природного кварцита».

Экспериментально пилотная линия переработки кварцитов

Прогнозные ресурсы кварцитов Восточного Саяна оцениваются порядка 130 млн. тонн и не имеют себе равных в России. По результатам проведенных

исследований разработана технологическая схема пилотной линии производства особо чистых кварцевых концентратов на основе кварцитов Восточного Саяна. Схема цепи аппаратов представлена на рис. 12.

Переработка данного типа кварцевого сырья позволит восполнить дефицит особо чистого кварцевого концентрата в наукоемких технологиях на многие годы.

По экспертной оценке, в 2026 году стоимость 1 кг особо чистых кварцевых концентратов будет составлять 9,1 доллара (695 рублей). Расчётная себестоимость кварцевых концентратов по предложенной технологии в 250 рублей/кг показывает перспективность реализации данного проекта.

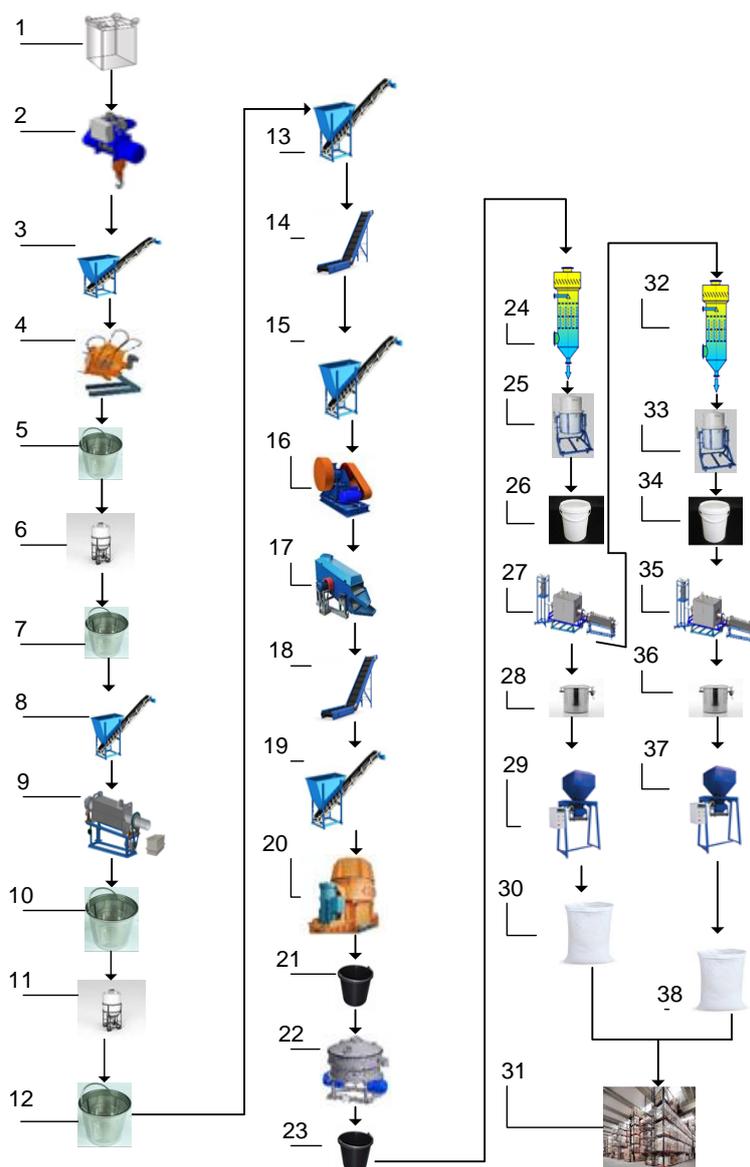


Рисунок 12 Схема цепи аппаратов для получения кварцевых концентратов. 1-биг бег; 2- тельфер; 3,8,13,15,19- бункер-питатель; 4- дезинтегратор; 5,7,10,12- тех. тара 1; 6,11- установка сушки; 9- установка термодробления; 14,18- ленточный конвейер; 16- щековая дробилка; 17- грохот; 20- дисковая мельница; 21,23- тех. тара 2; 22-ситовой классификатор; 24,32- установка химического обогащения; 25,33-нутч-фильтр; 26,34- тех. тара 3; 27,35- установка сушки-прокалки кварцевого концентрата тип 1; 28,36- тех. тара 4; 29,37- аппарат упаковки продукции; 30,38- тех. тара 5; 31- склад готовой продукции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе результатов, полученных с использованием комплекса современных методов исследования, решена актуальная научная задача – разработана технология переработки природных кварцитов Восточного Саяна на основе химического обогащения, имеющая большое значения для развития целого ряда российских технологических отраслей.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. В результате комплексного исследования кварцитов Восточного Саяна выделено семь продуктивных разновидностей кварцитов.

2. Обоснован выбор кислот и их реакционных смесей для осуществления химического обогащения (специальный метод обогащения). Оценка эффективности химического обогащения на основе подбора химических реагентов проверялась на мелкозернистом кварците по следующим семи экспериментальным вариантам: 1 – 10 % щавелевая кислота при комнатной температуре, продолжительность выдержки 16 часов; 2 – 10 % щавелевая кислота; 3 – 5 % щавелевая кислота, нейтрализация деионизированной водой, повторное химическое обогащение в растворе 10 % HNO_3 ; 4 - 10 % HNO_3 ; 5 - смесь 10 % HCl : 10 % HNO_3 в соотношении 3:1; 6 - смесь 10 % HCl : 10 % HF : 10 % HNO_3 в соотношении 3:1:1; 7 - смесь 20 % HCl : 20 % HF в соотношении 3:1. Выявлены наиболее эффективные кислоты и их смеси, проведены работы по оценке влияния фазового состояния крупки на эффективность обогащения кварцитов.

3. Разработана принципиальная технологическая схема переработки природных кварцитов Гарганской кварцитово́й зоны Восточного Саяна и гранулированного кварца Патомского наго (жила 2821) с получением кварцевых концентратов с суммарным содержанием 10 регламентируемых примесей менее 20 ppm, что соответствует характеристикам особо чистых кварцевых концентратов. Достигнуты следующие степени очистки: кварциты Уренгенурского блока 96%, суперкварциты 90%, мелкозернистые кварциты 82%, сливные кварциты Ока-Урикского участка 66%, порфириовидные кварциты 80%, первый тип сливных кварцитов Урда-Гарганского блока 91%, второй тип сливных кварцитов Урда-Гарганского блока 87%.

4. Изучены полиморфные переходы в кварцитах и их влияние на процессы получения кварцевого концентрата. На примере суперкварцитов Ока-Урикского блока показано, что для повышения степени очистки кварцитов необходимо использовать этап термодробления, степень очистки повышается на 10 и более %. На примере сливных кварцитов Ока-Урикского блока показано, что для удаления флюидных включений, находящихся внутри кварцевого зерна, требуется высокотемпературная прокалка. Использование данного этапа позволяет повысить степень очистки с 20% до 66%. Предварительная прокалка суперкварцитов приводит к увеличению концентрации структурного Al, содержание Al в кварцевом концентрате увеличивается с 4 ppm до 20 ppm. Степень очистки снижается с 90% до 70%.

5. Экспериментальным путём установлена зависимость между индексом кристалличности кварца и содержанием примесей в исходном сырье и концентрате.

6. Включение в технологическую схему переработки кварцитов Уренгенурского участка операции химического обогащения 10% раствором HCl, позволяет снизить содержания Са в кварцевом концентрате с 18.6 ppm до 1.7 ppm.

7. В результате выполненной работы разработаны и утверждены технические условия ТУ 5726-001-03533702-2014 «Кварцевые концентраты из природных кварцитов» и технологическая инструкция ТИ-003-2014 ИГХ «Изготовление образцов кварцевых концентратов из природного кварцита» для производства термостойкой кварцевой керамики.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Середкин Е.А. Фазовые переходы в кварцитах месторождения Бурал-Сардык // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2015. – № 4. – С.57-62.
2. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Соломеин О.Н./ Разработка технологии получения кварцевого концентрата из кварцитов Восточного Саяна // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. –2016. – №4. – С. 92-99.
3. Непомнящих А.И., Демина Т.В., **Жабоедов А.П.**, Елисеев И.А., Лесников А.К., Лесников П.А., Паклин А.С., Романов В.С., Сокольникова Ю.В., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю., Сапожников А.Н./ Оптическое кварцевое стекло на основе суперкварцитов Восточных Саян // Физика и химия стекла. –2017. – №3. – С. 288-295.
4. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Соломеин О.Н./ Кварцевые концентраты из кварцитов Восточного Саяна // Известия РАН. Серия физическая. –2017. – №9. – С. 1232-1237.
5. Непомнящих А.И., Волкова М.Г., **Жабоедов А.П.**, Лесников А.К., Лесников П.А., Паклин А.С., Сизова Т.Ю., Спиридонов А.М., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю./ Оптическое стекло из кварцитов Восточного Саяна // Физика и химия стекла. –2018. –№2. – С. 169-177.
6. Непомнящих А.И., Волкова М.Г., **Жабоедов А.П.**, Федоров А.М./ Кварцевые концентраты на основе сливного кварцита // Неорганические материалы. – 2018. – № 8. – С. 850-853.
7. Fedorov A. M., Makrygina V. A., Nepomnyaschikh A. I., **Zhaboedov A. P.**, Parshin A. V., Posokhov V. F. , Sokolnikova Yu. V. / Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia // Acta Geochim. – 2019. – 38. – pp. 22–39.
8. Непомнящих А.И., **Жабоедов А.П.**, Волкова М.Г., Федоров А.М., Яшин В.Н./ Комбинированная технология обогащения кварцитов Восточного Сая-

на // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №3. – С. 113-121.

9. **Жабоедов А.П.**, Зимин М.Д., Непомнящих А.И., Сапожников А.Н./ Индекс кристалличности структуры–критерий оценки обогатимости кварцевого сырья Восточного Саяна // Обогащение руд. –2020. –№1. – С. 36-40.
10. Mashkovtsev, R. I., Nepomnyashchikh, A. I., **Zhaboedov, A. P.**, & Paklin, A. S. (2021). EPR study of the E' defects in optical glasses and cristobalite. *EPL (Europhysics Letters)*, 133(1), 14003.

В прочих изданиях:

11. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Середкин Е.А./ Фазовые переходы в // Материалы конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии», Иркутск, 2013, с.140.
12. **Жабоедов А. П.**, Непомнящих А. И., Пресняков Р. В./ Исследование кварцитов месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян) // Вопросы естествознания. –2015. – №2. – С. 38-40.
13. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Середкин Е.А., Пресняков Р.В./ Изучение фазовых переходов в кварцитах месторождения Бурал-Сардык и гранулированном кварце Кыштымского месторождения // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участие «II Байкальский материаловедческий форум», Улан-Удэ. – 2015. – часть 2. – с. 42.
14. Непомнящих А.И., Демина Т.В., Елисеев И.А., **Жабоедов А.П.**, Махлянова А.М., Паклин А.С., Федоров А.М., Шалаев А.А./Кварциты Восточного Саяна перспективный нетрадиционный материал для получения прозрачного кварцевого стекла// Материалы Всероссийской конференция с международным участием «Месторождения камнесамоцветного и нерудного сырья различных геодинамических обстановок» (XVI Чтения академика А.Н. Заварицкого), Екатеринбург. – 2015. – с. 99.
15. Непомнящих А.И., Демина Т.В., **Жабоедов А.П.**, Елисеев И.А., Паклин А.С., Спиридонов А.М., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю., Шацкий В.С., Лесников П.А., Лесников А.К. Романов, В.С./ Кварциты Восточного Саяна – перспективное недефицитное сырье для получения особо-чистых кварцевых концентратов // Материалы международной научно-практической конференции «Промышленные минералы». Казань. – 2015. –С.162-165.
16. Непомнящих А.И., Волкова М.Г., Демина Т.В., Елисеев И.А., **Жабоедов А.П.**, Махлянова А.М., Паклин А.С., Сизова Т.Ю., Спиридонов А.М., Федоров А.М., Шалаев А.А./ Суперкварциты Восточного Саяна – новый нетрадиционный материал для получения прозрачного кварцевого стекла // Материалы XVII Российского совещания по экспериментальной минералогии. Новосибирск. –2015. – с.68.
17. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Пресняков Р.В, Канева Е.В./ Особенности фазовых переходов в кварцитах месторождения Бурал-Сардык // Материалы XV международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике. Иркутск. –2016. – с. 72.

18. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Пресняков Р.В., Канева Е.В., Козлов А.Н./ Кварцевые концентраты для получения высокотемпературной кварцевой керамики // *Материалы IX Всероссийской конференции «Керамика и композиционные материалы»*. Сыктывкар. – 2016. – С. 291-294.
19. Непомнящих А.И., Жабоедов А.П./ Полиморфные превращения в кварцитах Восточного Саяна // *Материалы первого Российского кристаллографического конгресса*. Москва. –2016. – с.37.
20. **Жабоедов А. П.**, Непомнящих А. И., Волкова М.Г./ Влияние минеральных, флюидных примесей и текстурных особенностей на технологию получения кварцевого концентрата // *Современные направления развития геохимии*. Иркутск. – 2017. – с. 151.
21. Непомнящих А.И., Федоров А.М., Яшин В.Н., Волкова М.Г., Зимин М.Д., **Жабоедов А.П.**/ Особо-чистые кварцевые концентраты на основе кварцитов Восточного Саяна// *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участие «III Байкальский материаловедческий форум»*, Улан-Удэ. – 2018. – часть 2. – С. 94-95.
22. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Зимин М.Д./ Получение кварцевых концентратов для оптического кварцевого стекла из кварцитов Восточного Саяна // *Материалы XVI международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 100-летию Иркутского государственного университета*. Иркутск. – 2018. – с. 62.
23. **Жабоедов А.П.**, Зимин М.Д., Непомнящих А.И./ Оценка степени обогатимости кварца методом инфракрасной спектроскопии и рентгеноструктурным анализом // *Юбилейная международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске ллф-2019*. Иркутск. – 2019. – С.36-37.
24. Зимин М.Д., **Жабоедов А.П.**, Паклин А.С., Непомнящих А.И./ Влияние этапов пробоподготовки кварцевого сырья на РСА индекс кристалличности структуры кварца // *Материалы VIII международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» посвященная 150-летию открытия Д.И. Менделеевым Периодического закона химических элементов. Третья Международная школа молодых ученых «Актуальные проблемы современного материаловедения»*. Москва. – 2019. – с. 99.
25. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И./ Влияние этапов термообработки на степень очистки кварцевых концентратов на примере суперкварцитов Восточного Саяна// *Современные проблемы геохимии 2021*. Иркутск. – 2021.- С. 100-101.
26. **Жабоедов А.П.**, Непомнящих А.И., Зимин М.Д., Паклин А.С./ Кварциты Восточного Саяна- природное минеральное сырье для высокотехнологичного кварцевого стекла // *Третья Российская конференция с международным участием «Стекло: наука и практика» GlasSP2021*. Санкт-Петербург. -2021.- с. 143.

Подписано в печать 15.10.2021.
Форм. бум. 60*90/16. Бумага ксерографическая.
Способ печати оперативный. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд.л.2,6.
Заказ № 80. Тираж 80 экз.

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита. ул. Александро-Заводская, 30