

УДК 551.2.03

## ГЕОХИМИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ И КВАРЦИТОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ХРЕБТА БОРЩОВОЧНЫЙ (Забайкалье)

А.М. Федоров<sup>1,✉</sup>, Г.А. Юргенсон<sup>2</sup>, А.И. Непомнящих<sup>1</sup>, А.П. Жабоедов<sup>1</sup>, М.Д. Зимин<sup>1</sup>,  
З.И. Куликова<sup>1</sup>, В.А. Макрыгина<sup>1</sup>, О.И. Чачанагова<sup>1</sup>, Д.Ц. Аюржанаева<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия

Поступила в редакцию: 22.01.2025

Принята в печать: 05.05.2025

Опубликована онлайн: 08.05.2025

DOI: [10.15372/GiG2025128](https://doi.org/10.15372/GiG2025128)

EDN: [RVVWEF](https://www.edn.ru/RVVWEF)

Ссылка для цитирования:

**Федоров А.М., Юргенсон Г.А.,  
Непомнящих А.И., Жабоедов А.П.,  
Зимин М.Д., Куликова З.И., Макрыгина В.А.,  
Чачанагова О.И., Аюржанаева Д.Ц. (2025).**

Геохимия, минералогия и источники вещества кварцевых жил и кварцитов южной части хребта Борщовочный (Забайкалье) // Геология и геофизика, т. 66, № 8, с. 1006–1021, DOI: [10.15372/GiG2025128](https://doi.org/10.15372/GiG2025128), EDN: [RVVWEF](https://www.edn.ru/RVVWEF).

© А.М. Федоров, Г.А. Юргенсон, А.И. Непомнящих, А.П. Жабоедов, М.Д. Зимин, З.И. Куликова, В.А. Макрыгина, О.И. Чачанагова, Д.Ц. Аюржанаева, 2025

✉E-mail: [sashaf@igc.irk.ru](mailto:sashaf@igc.irk.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Кварцевые жилы южной части хр. Борщовочный под названием Ундинской площади жильного кварца впервые в самом общем виде были описаны А.Г. Малышевым и В.М. Мишеновым в 1977 г. Было показано, что в наиболее чистых его разностях содержание элементов-примесей находится в пределах 95–135 г/т. Они предположили, что это позволяет относить их ко вторым-третьим сортам кварца для производства кварцевого стекла. В пределах этой площади в Бальейском районе Забайкальского края в окрестностях с. Джиды в западном обрамлении хр. Борщовочный в поле развития кварцевых жил Г.А. Юргенсоном и А.Х. Мухамедшиным в 1992 г. выполнено опробование и определены примеси в жильном кварце. Концентрации элементов-примесей по небольшой выборке (50 проб) составили в среднем 80–165 г/т [Юргенсон, 2009]. Кварцевые жилы как возможный источник высокочистого кварца Ундинской площади описаны также в работе Л.И. Ялович и А.В. Татарина [Ялович, Татарин, 2005]. Они показали геолого-структурное положение жил и дали предварительную оценку перспектив кварца этого участка.

Изучены кварцевые жилы и кварциты Ундинской кварцевожильной зоны (южная часть хр. Борщовочный) Аргунского блока Монголо-Охотского складчатого пояса современными высокоточными методами. Дана первая детальная характеристика минералогических, петрографических и геохимических особенностей кварца Ундинской зоны. Пробы жильного кварца и кварцитов, отобранные на тектоническом контакте разgneисованных среднепозднеюрских гранитоидов борщовочного комплекса и перекрывающих их вулканогенно-осадочных пород аккреционного комплекса среднеюрского возраста (алангуйская свита), интенсивно деформированы и милонитизированы. Другая часть кварцевых жил формируется в метаморфических породах, расположенных на удалении от тектонизированной зоны (Джидинский участок), слабо гранулированы. Изучены флюидные включения в жильном кварце на Борщовочном и Талангуйском участках. Кварцевые жилы и кварциты генетически связаны с вмещающими их породами и наследуют их геохимические и изотопные черты. В результате деформационных процессов уменьшается содержание и изменяется соотношение элементов-примесей в кварцевых жилах и кварцитах.

*Жильный кварц, кварциты, геохимия, флюидные включения, изотопы кислорода, хребет Борщовочный, Забайкалье*

В статье рассматриваются первые данные об изучении кварцевых тел Талангуйского, Борщовочного и Джидинского участков Ундинской зоны. Для оценки качества кварцевого сырья важное значение имеют минеральный состав кварцевых пород, распределение минеральных включений в них, содержание и состав флюидных включений. Определяющее значение для формирования химического состава жильного кварца имеют его источники, генезис месторождения и условия наложенного процесса метаморфизма.

В полевых условиях отнести кварцевые породы по внешнему виду к гидротермальному, магматогенному или метаморфогенному типам затруднительно при плохой отпрепарированности пород. Петрографические исследования также не всегда гарантируют качественное разделение этих пород по группам. Производились попытки разделения пород по таким геохимическим критериям, как соотношение алюминия, титана и германия для разделения типов магматогенного и гидротермального кварца [Schrön et al., 1988; Götze, 2009]. Для целей классификации кварцевых пород различных генетических типов проводились исследования редкоземельных (РЗЭ) [Götze,

Lewis, 1994; Поленов и др., 2013], а также редких элементов [Светова и др., 2012; Müller et al., 2015]. В частности, исследования РЗЭ в кварце, сопоставленные с модельными распределениями в кварце из различных пород, позволили определить источники вещества кварцевых песков [Götze, Lewis, 1994].

Исследования фракционирования изотопов кислорода в кварце опирающиеся на температурную зависимость в магматогенных [Stewart et al., 1986], гидротермальных [Иконникова и др., 2009] и аутигенных [Perry, Tan, 1972; Soong, Blattner, 1986; Halas et al., 2015; Kenny, 2017] системах минералообразования, позволили оценить генетическую предрасположенность кварцевых тел Ундинской зоны.

Целью работы является детальная характеристика и классификация жильного кварца и кварцитов этой части хр. Борщовочный на основе полученных комплексных петрографических, электронно-микроскопических, геохимических, изотопных и термобарометрических исследований. Важной частью исследования является оценка эволюции геохимического и минералогического состава кварца при наложенных динамометаморфических процессах.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате полевых исследований проведен отбор проб разновидностей кварца и кварцитов Ундинской зоны Аргунского блока Монголо-Охотского складчатого пояса. Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой определены содержания редких и рассеянных элементов в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН, г. Иркутск). Определение изотопного состава кислорода проведено в Геологическом институте им. Н.Л. Добрецова СО РАН (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ).

Аналізу подвергались исходные пробы массой до 300 г. Методики пробоподготовки, исключаящие техногенное заражение пробы, разработаны в ИГХ СО РАН [Непомнящих и др., 2017, 2018].

Минералого-петрографическое изучение пород проводилось как в проходящем, так и в отраженном свете с помощью бинокля Olympus SZX7 DFPLAPOIX и микроскопов Olympus BX 51, оборудованных фотокамерами PixeLink 1394 и AXIO Score A1. Для исследования флюидных включений использовалась криотермокамера Linkam THMSG-600, позволяющая измерять температуры фазовых переходов в интервале от  $-196$  до  $+600$  °С. Точность измерений составляет  $\pm 0.1$  °С в интервале температур от  $-20$  до  $+80$  °С и  $\pm 1$  °С за его пределами.

Гранулометрический анализ зерен кварца в каждом прозрачном шлифе проводился на трех изображениях с двухкратным увеличением со скрещенными поляризаторами. Для достижения уникальной интерференционной окраски каждого зерна изображения были получены под разными углами ( $0^\circ$ – $25^\circ$ –

$50^\circ$ ). Границы зерен размечались вручную с помощью графического редактора Paint.NET. Распознавание зерен и расчет их параметров осуществлялись в программе ImageJ [Schneider et al., 2012].

Применение сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволило уточнить составы минералов для поддержки геохимических данных, а также выделить субмикронные минеральные фазы. Исследования методом СЭМ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3 LMN (TESCAN, s.r.o., г. Брно, Чехия) в ИГХ СО РАН. Измерения проведены при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, интенсивность пучка 18.5 имп., поглощенный ток 4.6 нА, диаметр зонда 100 нм, время экспозиции набора спектра составляло от 30 до 60 с. Элементный состав минералов определяли с помощью системы энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 в программном обеспечении Aztec. В качестве эталона для энергетической калибровки спектров использовали стандарт из чистого кобальта.

Определения изотопного состава кислорода выполнялись на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт–образец) в ГИН СО РАН (аналитик В.Ф. Посохов). Подготовка образцов для определения изотопного состава кислорода проводилась с использованием метода лазерного фторирования (ЛФ) в присутствии реагента  $\text{BrF}_3$ . В комплект входит установка MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером  $\text{CO}_2$  мощностью 100 Вт и длиной волны 10.6 мкм в инфракрасной области, позволяющая разогревать анализируемые минералы до 1000 °С, а также вакуумная магистраль для очистки выделенного газа с криогенными ловушками и специальным сорбентом, охлаждаемым жидким азотом, для окончательного концентрирования кислорода.

Проведение реакции происходило в оперативном режиме с полным контролем по монитору, что позволяло визуально контролировать ход реакции и полноту разложения, менять режим (мощность и фокусировку лазерного луча) для достижения полного сгорания образца. При ЛФ не происходит фракционирования кислорода из-за малого времени проведения реакции и высокой температуры. На разложение одного образца требуется не более 15–20 мин, что сводит к минимуму возможность загрязнения полученного газа атмосферными примесями.

Для изотопного анализа кислорода использовались только визуально чистые минералы (в виде осколков) общей массой 1.5–2.5 мг. Контроль материала на наличие минеральных включений для изотопных исследований проводился с помощью микроскопа Микромед MC-5-Zoom-Led. Расчеты  $\delta^{18}\text{O}$  были выполнены относительно международного стандарта NBS-28 (кварц) и выверенных относительно него внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного

в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин  $\delta^{18}\text{O}$  находилась на уровне  $(1\sigma) \pm 0.2 \text{ ‰}$ .

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Исследуемый участок расположен в юго-западном замыкании хр. Борщовочный (Восточное Забайкалье). Хребет Борщовочный имеет ширину около 35 и длину до 450 км и протягивается в северо-восточном направлении от устья р. Унда (место ее впадения в р. Онон до устья р. Шилка (место слияния с р. Аргунь)). Кварцевые жилы и кварциты изучались на юго-западном фланге хр. Борщовочный на участке длиной 25 и шириной 10 км к северу от р. Унда в нижнем ее течении на промежутке от пос. Ундино-Поселье до ее впадения в р. Онон (бывшее с. Джиды).

В пределах изучаемого района (рис. 1) наблюдаются осадочные породы среднего палеозоя, а также вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы верхнего мезозоя (шадоронская серия, талангуйская свита). Пробы кварца Талангуйского участка отобраны из кварцевых жил, развитых среди вулканогенно-осадочных пород талангуйской свиты.

Основной объем пород участка приходится на интрузивные образования раннего палеозоя (олекминский комплекс) и верхнего мезозоя (борщовочный комплекс). Пробы жильного кварца и кварцитов Борщовочного участка отобраны в области распространения пород борщовочного комплекса. Часть вмещающих пород этого участка подвержены интенсивным тектоническим деформациям в виде милонитизации и катаклаза.

В пределах хр. Борщовочный широко распространены метаморфические докембрийские породы урульгинского и чонгульского комплексов и среднепалеозойские агинско-борщовочного комплекса. Породы, вмещающие гранулированные кварцевые жилы Джидинского участка, представлены крупнозернистым амфиболитом и мелкозернистым биотитовым гранитом.

Породы хр. Борщовочный испытали многофазный и многовекторный режим деформаций. Агинско-Борщовочная зона представляет собой набор линзовидных тектонических блоков и пластин северо-восточного простирания, в осевой части которой залегает Борщовочный гранитный плутон. Зона зажата между крупными Западно-Становой и Газимуро-Агинской сиалическими глыбами. Самые ранние правосторонние структуры сжатия Агинско-Борщовочной зоны интенсивно деформированы левосторонними мезозойскими с образованием разнопорядковых S-образных мезо- и мегаструктур вращения. Позднемезозойские разрывные нарушения частично наследуют системы древних зон и соответствуют обстановкам

растяжения: сбросы, сбросо-выдвиги и, возможно, раздвиги [Рутштейн и др., 2015].

Пробы отбирались преимущественно из крупных развалов и изредка из коренных обнажений. Большая часть жил с достоверными элементами залегания протягивается в север–северо-западном ( $330\text{--}340^\circ$ ), север–северо-восточном ( $0\text{--}30^\circ$ ) и субширотном направлении ( $80\text{--}90^\circ$ ). Углы падения жил варьируют от  $25^\circ$  до субвертикальных.

## ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ И КВАРЦИТОВ УНДИНСКОЙ ЗОНЫ

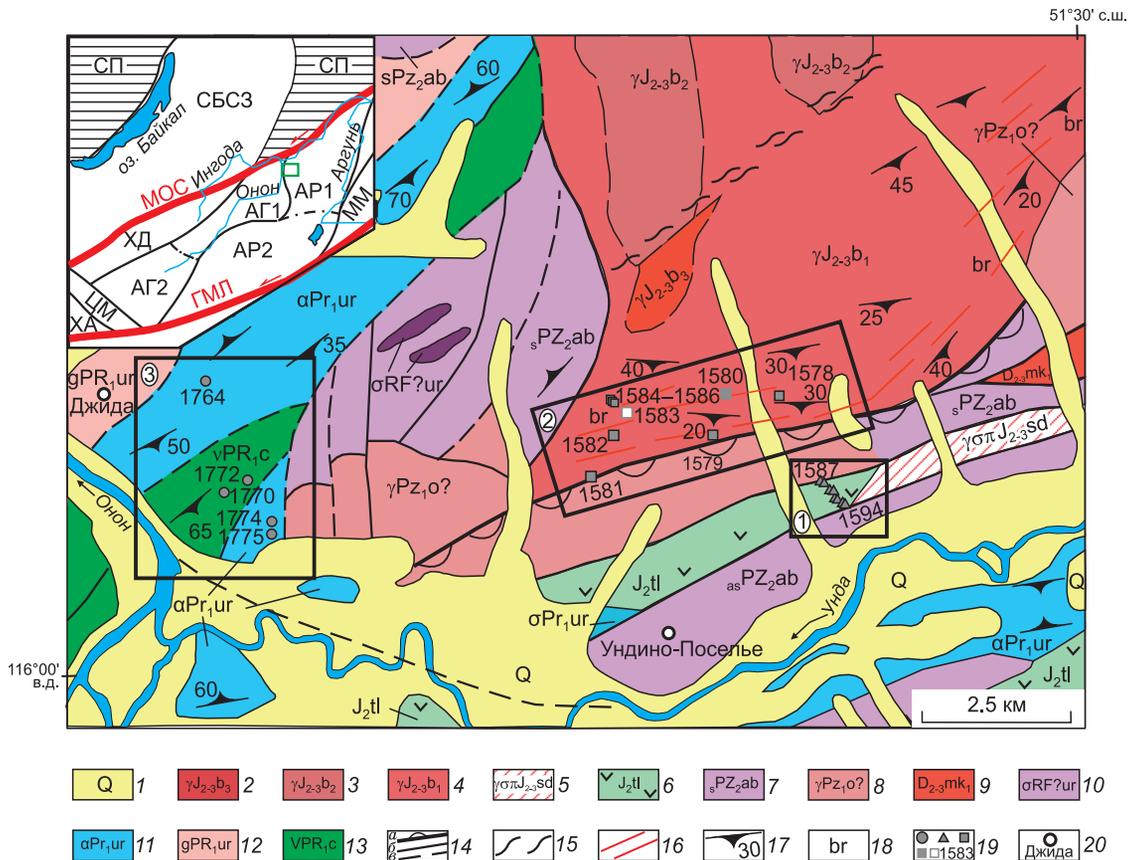
На чистоту кварцевого агрегата влияют различные факторы: исходное содержание примесей в кварцевых жилах, пластическая деформация и трещиноватость, степень перекристаллизации (грануляции) кварцевых зерен с одновременной их очисткой от примесей.

**Жильный кварц Талангуйского участка** имеет цвет от белого до серого, с розовым оттенком, иногда до светло-вишневого, преимущественно сахаровидный, часто сливной, ожелезнен по кавернам и трещинам.

Кварцевые жилы Талангуйского участка (от микро- до крупнозернистых) в той или иной степени пластически деформированные и реже – гранулированные и рекристаллизованные (неравномерно-зернистые). Более крупные зерна с размерами до  $4.6 \times 3.2$  мм неправильной удлиненной или изометричной формы с зубчатыми и ступенчатыми границами. В зернах отмечается блокирование – блоки удлиненной формы с сутурными извилистыми границами и блоки ромбической формы в комбинации с изгибами. Погасание блочно-волнистое (рис. 2, а). Мелкие зерна также характеризуются неровными границами и обычно с облачно-мозаичным погасанием.

По извилистым трещинам развивается микрозернистый кварц, образуя тонкие прожилки. Из включений встречаются мелкие чешуйки мусковита, гидроксиды железа, частицы рудного минерала.

По мере усиления пластической деформации кварц подвергается грануляции – происходит преобразование крупных зерен кварца в микромелкозернистый кварцевый агрегат. Эти процессы более проявлены в пробах 1587–1589 (см. рис. 2, б–г). Визуально кварцевый агрегат в них наиболее чистый. Наблюдается постепенное уменьшение размеров мелкозернистого кварца от  $2.5 \times 0.5$  до  $0.7 \times 0.3$  мм. Мелкие зерна удлиненной неправильной формы со ступенчатыми неровными границами и облачно-мозаичным угасанием постепенно преобразуются в микрозернистые и их размеры меняются от  $0.09\text{--}0.20$  мм в шлифе 1589 до  $0.02 \times 0.02\text{--}0.05 \times 0.03$  мм в шлифе 1587. Микрозернистый кварц, который явля-

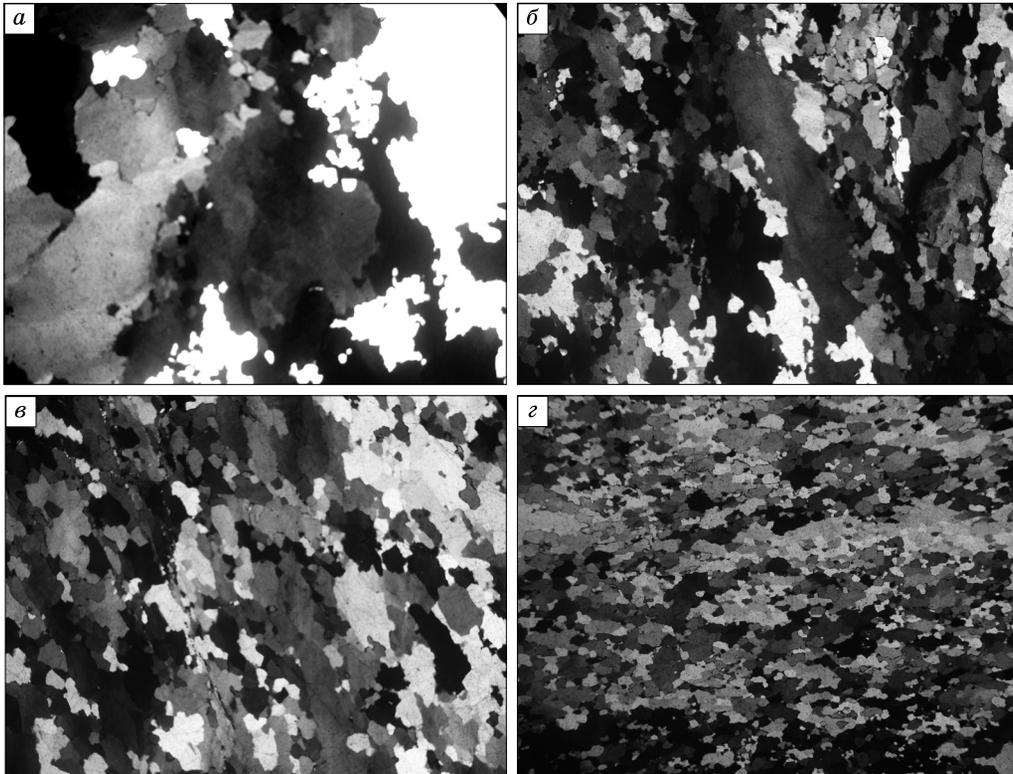


**Рис. 1.** Геологическая схема Ундиинской кварцевожильной зоны, по материалам [Рутштейн и др., 2015]. На врезке показан коллаж территорий юго-западной части Монголо-Охотского складчатого пояса, по [Гордиенко и др., 2019]: СП – Сибирская платформа; СБСЗ – Саяно-Байкальская складчатая зона; террейны: АГ1 и АГ2 – Агинский, АР1 и АР2 – Аргунский, ММ – Мамынский, ЦА – Хангайский, ЦМ – Центральнo-Монгольский; МОС – Монголо-Охотская сугура, ГМЛ – Главный Монгольский линеймент, зеленым прямоугольником обозначен участок работ. 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2–4 – борщовочный комплекс гранитов: 2 – третья фаза (граниты двуслюдяные; мусковитовые, пегматоидные жилы и дайки пегматитов, аплитов), 3 – вторая фаза (граниты порфиробластовые, гнейсовидные, гранодиориты, граносиениты), 4 – первая фаза (граниты гнейсовидные, гранодиориты, граносиениты); 5 – шадоронский комплекс андезит-дацитовый (жерловые и экструзивные образования, агломератовые туфы, эксплозивные и лавовые брекчи дацитов, андезибазальтов, андезитов); 6 – талангуйская свита шадоронской серии (андезиты, андезибазальты, базальты, кластолавы и туфы андезитов, песчаники, туфобрекчи, туфоконгломераты, конгломераты, туфоалевролиты); 7 – агинско-борщовочный комплекс динамометаморфический (филлонитовый подкомплекс, филлониты, сланцы углисто-слюдистые, кварциты, тектонические меланжи); 8 – олекминский комплекс гранитовый (граниты, гранодиориты; дайки аплитов, пегматитов); 9 – нижняя подсвита макаровской свиты (сланцы глинистые, кремнисто-глинистые, углисто-серицитовые, алевролиты, песчаники, филлиты, конгломераты, олистостромы); 10 – ургунинский комплекс серпентинитовый (сланцы серпентинитовые, серпентиниты); 11 – урульгинский комплекс метаморфический (амфиболитовый подкомплекс; амфиболиты, кварциты, мраморы); 12 – урульгинский комплекс метаморфический (гнейсовый подкомплекс; гнейсы биотитовые, кварциты, кальцифиры); 13 – чонгульский комплекс габбровый (габбро, пироксениты; кварцевые диориты, диориты); 14 – разрывные нарушения: а – выдвиги, б – разломы достоверные, в – разломы предполагаемые; 15 – зоны расщепления и повышенной трещиноватости; 16 – тектониты нерасчлененные (милониты, ультрамилониты, бластомилониты, катаклазиты); 17 – элементы залегания метаморфической полосчатости и гнейсовидности; 18 – метасоматически измененные породы (br – березиты); 19 – места отбора и номера проб классифицированных кварцевых пород по участкам слева направо: Джидинский, Талангуйский, Борщовочный, пробы 1580 и 1583; 20 – название населенного пункта. Прямоугольниками с цифрами показаны участки детальных работ: 1 – Талангуйский, 2 – Борщовочный, 3 – Джидинский.

ется конечным итогом грануляции, отмечается в зернах изометричной или слабо удлиненной формы с нормальным погасанием.

**Кварц Борщовочного участка** преимущественно серый до белого, зачастую сливной с видимыми минеральными включениями. Проба 1580 представляет

собой, вероятнее всего, мелкозернистый кварцит, а пр. 1583 – милонитизированный, неравномерно-зернистый кварцит, остальные пробы представлены гидротермальным жильным кварцем. Пробы кварцитов 1580 и 1583 сложены преимущественно серым, от мелко- до крупнозернистого, сливным, замутненным



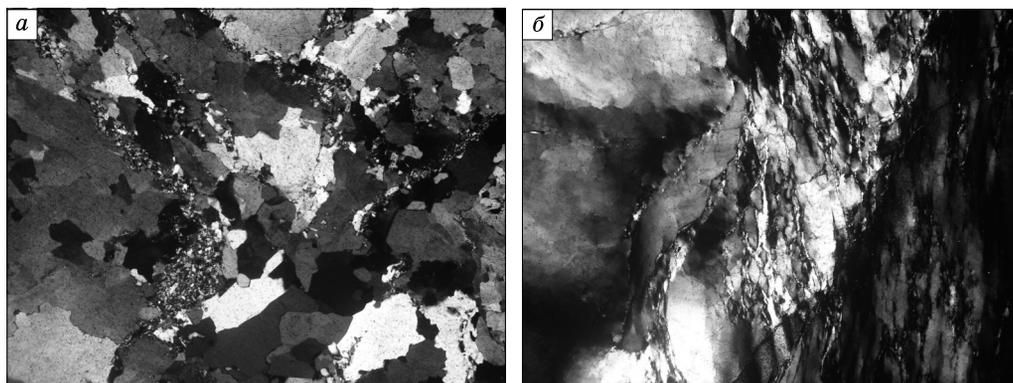
**Рис. 2.** Кварц Талангуйского участка: *a* – жила средне- и мелкозернистого кварца, подверженная пластической деформации (пр. 1591); *б* – жила микромелкозернистого слабогранулированного кварца (пр. 1589); *в* – жила микромелкозернистого гранулированного кварца с микрозернистым кварцем по трещине (пр. 1588); *з* – жила тонко-микрозернистого гранулированного кварца (пр. 1587). Поле зрения по горизонтали 4.5 мм. Николи  $\times$ .

кварцем, иногда прозрачным, ожелезненным по трещинам и поверхностям сколов. Характерной особенностью пр. 1583 является то, что в ней наблюдаются удлиненные до 6 мм субпараллельные порфиробласты кварца.

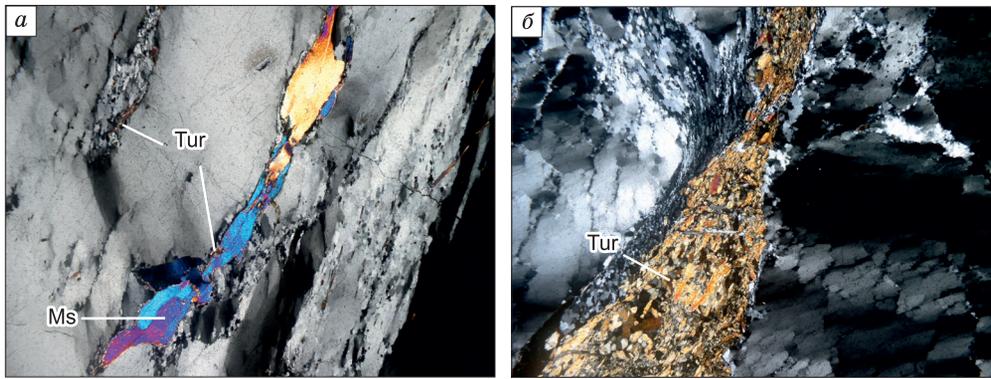
Главное отличие кварца Борщовочного участка от остальных проявлено в его более интенсивных катаклазе, милонитизации и грануляции. Отмечается сочетание пластической деформации зерен кварца и трещин хрупкой деформации. Трещины расположе-

ны беспорядочно, по ним развивается микрозернистый раздробленный кварц с примесью чешуек мусковита (рис. 3, *a*). Зерна кварца разных форм и размеров, границы их неровные зубчатые, ступенчатые, зерна вдаются друг в друга. Они подвержены пластической деформации, блокованы, погасание волнистое, облачно-мозаичное.

При большей интенсивности деформации гигантозернистого кварцевого агрегата отмечаются участки зерна, по-разному пластически деформированные



**Рис. 3.** Кварц Борщовочного участка: *a* – мелко- и среднезернистый кварцевый агрегат, разбитый беспорядочно расположенными трещинами, заполненными микрозернистым раздробленным кварцем с примесью чешуек мусковита (пр. 1578); *б* – крупнозернистый кварцевый агрегат, участки зерна по-разному пластически деформированы благодаря системе пересекающихся и изгибающихся трещин (пр. 1582). Поле зрения по горизонтали 4.5 мм. Николи  $\times$ .



**Рис. 4.** Кварц Борщовочного участка с минеральными включениями: *a* – жила крупнозернистого кварца с включениями мусковита и турмалина (пр. 1585); *б* – жила крупнозернистого кварца с турмалином по трещинам (пр. 1586). Поле зрения по горизонтали 4.5 мм. Николи  $\times$ .

благодаря системе пересекающихся и изгибающихся трещин (см. рис. 3, *б*). На одном участке зерна пластинки деформации наблюдаются в виде узких субпараллельных линий, и часть зерна как бы разделяется на узкие субпараллельные полосы. На другом участке часть зерна распадается на отдельные линзовидные тела с волнисто-блоковым погасанием. На третьем участке пластинки деформации подвержены изгибам и разнонаправленным, отчего получается сложная мозаичная картина.

Многочисленные трещины, наблюдаемые в этих кварцах, рассекают, как правило, все типы кварцевых агрегатов и сложены тонкозернистым катаклазированным, преимущественно кварцевым материалом. Обломки катаклазированного кварца могут иметь форму от изометричной и даже округлой до треугольной и удлиненной.

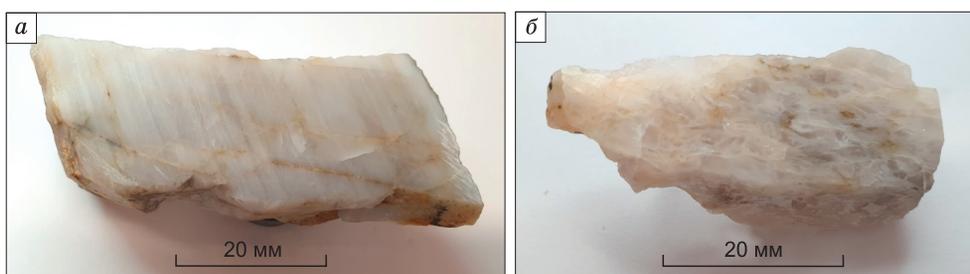
Аутигенные мелкие зерна кварца отличаются достаточно ровными границами и ровным погасанием. Кроме того, мелкие перекристаллизованные кварцевые зерна второй генерации пересекают ответвляющиеся, перовидные зоны трещин, сложенные новообразованным кварцем. Кроме кварца, по трещинам в виде небольших по размеру иголочек и пластинок развиваются светлая слюда (иногда до 0.5–3.0 мм), а также гетит, турмалин и другие минералы (рис. 4, *a*). В некоторых пробах зерна турмалина с размерами от 0.05 × 0.009 до 0.2 × 0.09 мм, развивающегося по тре-

щинам, могут занимать до 5 % поверхности шлифа (см. рис. 4, *б*). Зерна турмалина, как правило, ориентированы вдоль трещин и могут быть рассечены более поздними зернами кварца. В зонах катаклаза зерна турмалина определенной ориентировки не имеют.

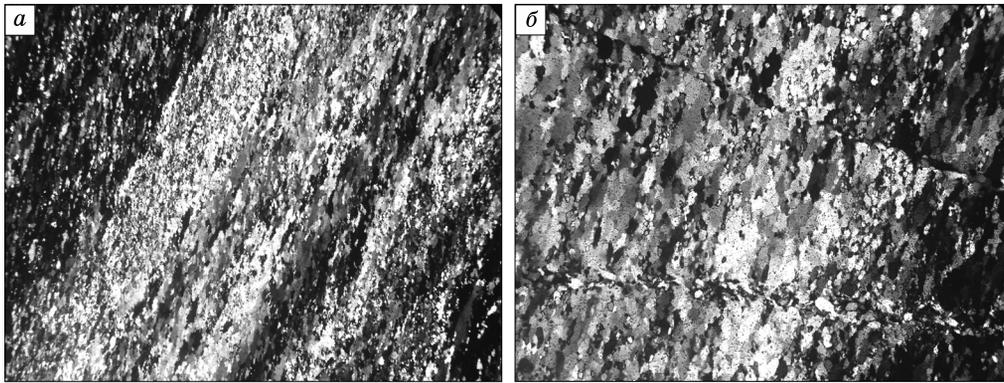
В кварцитах кварцевый агрегат тонкозернистый (рис. 5; 6, *a, б*). Микрозернистый кварц в зернах изометричной формы с размерами 0.01 × 0.01–0.03 × 0.03 мм составляет 90 % площади шлифа. Чуть более крупные зерна кварца удлиненной линзовидной формы с неровными краями и слабеволнистым или облачно-мозаичным угасанием с размерами от 0.1 × 0.05 до 0.3 × 0.1 мм занимают около 10 % площади. Мелкие зерна изометричной формы образуют скопления. По длинной оси зерна кварца ориентированы в одном направлении. Чередуются прослойки с преобладанием мелких или крупных зерен.

Встречаются единичные мелкие чешуйки хлорита, мусковита, частицы гидроксидов железа и единичное зерно титанита. По трещинам, занимающим секущее положение по отношению к сланцеватости, отмечается микрозернистый кварц и рудные частицы.

В неравномерно-зернистых кварцитах происходит рост зерен кварца. Изначально образуются зерна кварца линзовидной формы с размерами 2.3 × 0.5–3.4 × 0.7 мм, по длинной оси ориентированные в одном направлении (40 % площади шлифа) (см. рис. 5, *б*; 7, *a*). По краям этих зерен находится исходный мик-



**Рис. 5.** Кварциты Борщовочного участка: *a* – микрозернистый (пр. 1580); *б* – неравномерно-зернистый (пр. 1583).



**Рис. 6.** Микрозернистый кварцит Борщовочного участка (пр. 1580): *a* – чередуются прослойки с преобладанием мелких или крупных зерен; *b* – то же при большем увеличении, по секущим трещинам развивается микрозернистый кварц. Поле зрения по горизонтали: *a* – 4.5 мм; *b* – 1.8 мм. Николи  $\times$ .

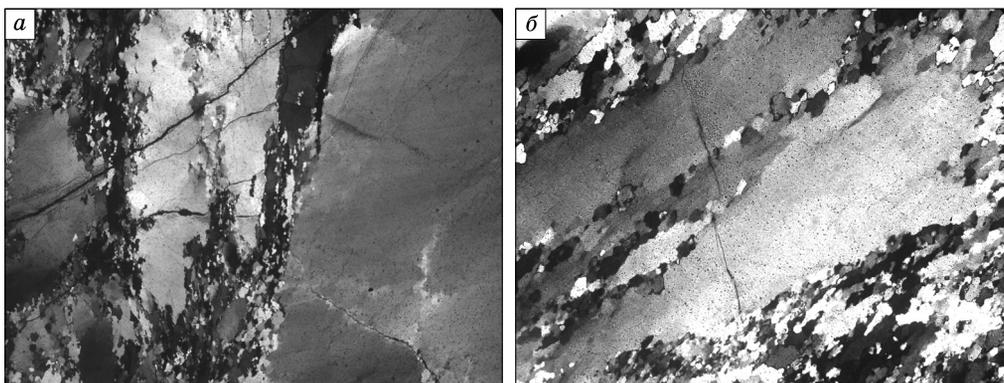
розернистый кварцевый агрегат, составляющий 25 % площади. В этом микрозернистом кварцевом агрегате встречаются более крупные зерна, которые имеют размеры  $0.3 \times 0.1$  мм, удлинненную форму и слабеволнистое угасание. Мелкие зерна изометричной формы с ровными границами и прямым погасанием имеют размеры от  $0.03 \times 0.02$  мм. В конечном итоге образуются крупные зерна величиной  $11 \times 5$  мм неправильной формы с блочно-волнистым погасанием, пересекающие беспорядочно расположенными трещинами с раздробленным микрозернистым кварцем (35 % площади шлифа) (см. рис. 7, *b*).

Возможно, что неравномерно-зернистый и тонко-микрозернистый кварцит представляют собой продукты грануляции. Крупные зерна кварца с размерами до  $11 \times 5$  мм являются исходными. Полосы пластической деформации пересекаются, и слои новообразованного кварца расчленяют зерна исходного кварца на отдельные фрагменты. При этом образуются зерна кварца линзовидной формы, по длинной оси ориентированные в одном направлении (см. рис. 5, *b*; 7, *a, б*), и структуру породы можно назвать

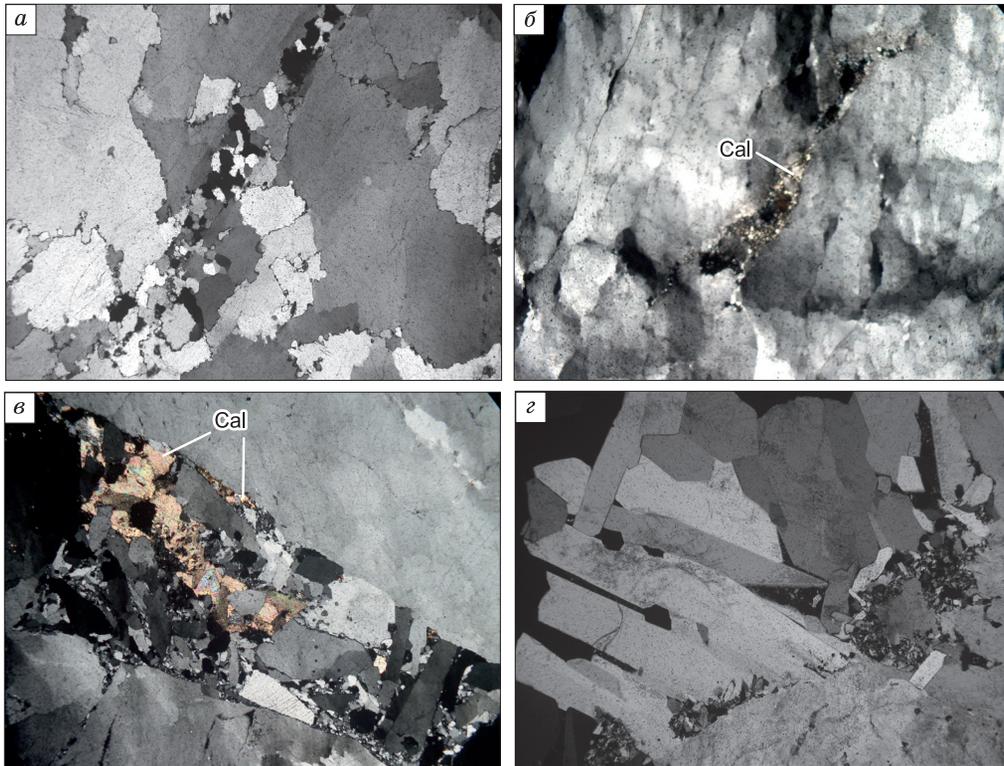
псевдопорфириобластовой. В промежутках между линзовидными зернами находится тонкомикрозернистый кварцевый агрегат, и тонкомикрозернистый кварцит является, вероятно, конечным продуктом грануляции (см. рис. 5, *a, б*).

**Жильный кварц Джидинского участка** представлен преимущественно крупнозернистым кварцевым агрегатом чистого белого цвета, сложенным прозрачными зернами. В двух образцах отмечаются мелкие пустоты с кристалликами шестоватого кварца.

Кварцевый агрегат в жилах Джидинского участка менее гранулирован по сравнению с кварцевыми жилами Талангуйского и Борщовочного участков. В жилах отмечаются преимущественно крупнозернистые кварцевые агрегаты, но есть и мелкосреднезернистые (рис. 8, *a*). Форма зерен неправильная, как изометричная, так и сильно удлиненная, края неровные и зубчатые. Структура кварцевого агрегата грубо- и неравномерно-зернистая, гранобластовая зубчатая. Кварц пластически деформирован, погасание, как правило, волнистое и облачно-мозаичное, крупные зерна системой разноориентированных трещин раз-



**Рис. 7.** Неравномерно-зернистый кварцит Борщовочного участка (пр. 1583): *a* – справа крупное зерно кварца с размерами  $11 \times 5$  мм, которое является итогом процесса роста зерен; *b* – растущие за счет мелких более крупные зерна кварца линзовидной формы с агрегатом микрозернистого кварца между ними. Поле зрения по горизонтали: *a* – 1.8 мм; *b* – 4.5 мм. Николи  $\times$ .

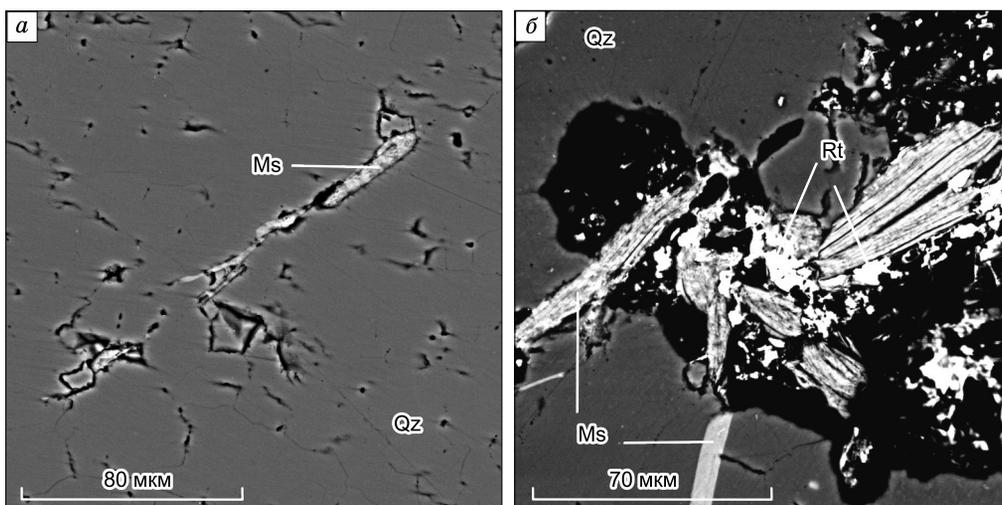


**Рис. 8.** Кварц Джидинского участка: *а* – жила мелко- и среднезернистого кварца, катаклазированная, по трещине кварц раздроблен (пр. 1770); *б* – крупнозернистый пластически деформированный кварц с облачно-мозаичным угасанием и включениями карбоната по трещине (пр. 1772); *в* – по трещине, пересекающей зерно кварца, развиты раздробленный кварц и карбонат (пр. 1774); *з* – шестоватый агрегат зерен кварца с ровными границами и нормальным погасанием, пустоты и гидроксиды железа в промежутках между зернами кварца (пр. 1773). Cal – кальцит. Поле зрения по горизонтали 4.5 мм. Николи ×.

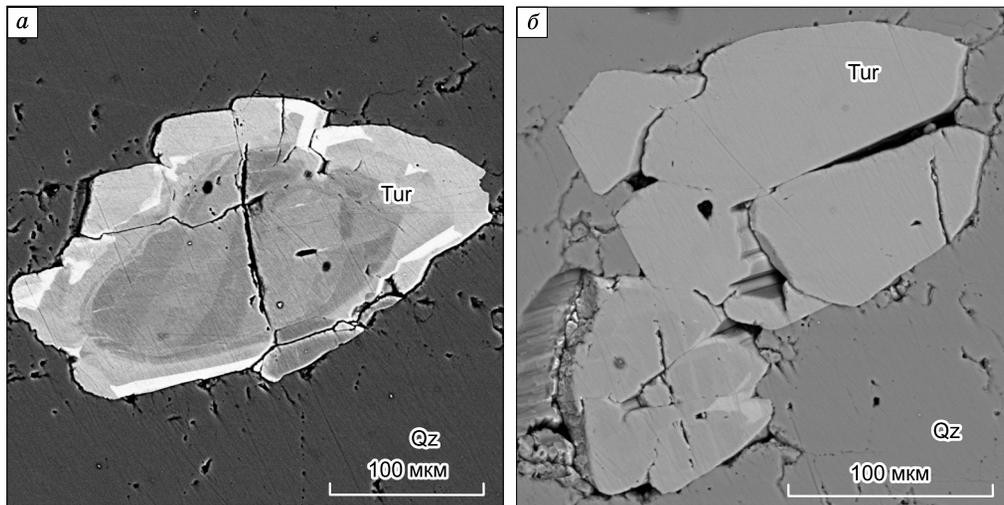
биты на блоки ромбовидной и прямоугольной форм в сочетании с изгибами (см. рис. 8, *б*). В промежутках между зернами кварца встречаются единичные чешуйки мусковита, по крупным трещинам развиты микрозернистый кварц и карбонат (см. рис. 8, *в*). В пу-

стотах отмечаются шестоватые агрегаты кварца с гидроксидными железами между его зернами (см. рис. 8, *з*).

Исследования микрофаз на сканирующем электронном микроскопе показали, что преобладающей примесью в кварце Ундинской зоны является тонко-



**Рис. 9.** СЭМ изображение: *а* – мусковита в кварце пр. 1580; *б* – мусковита и рутила в пр. 1587.

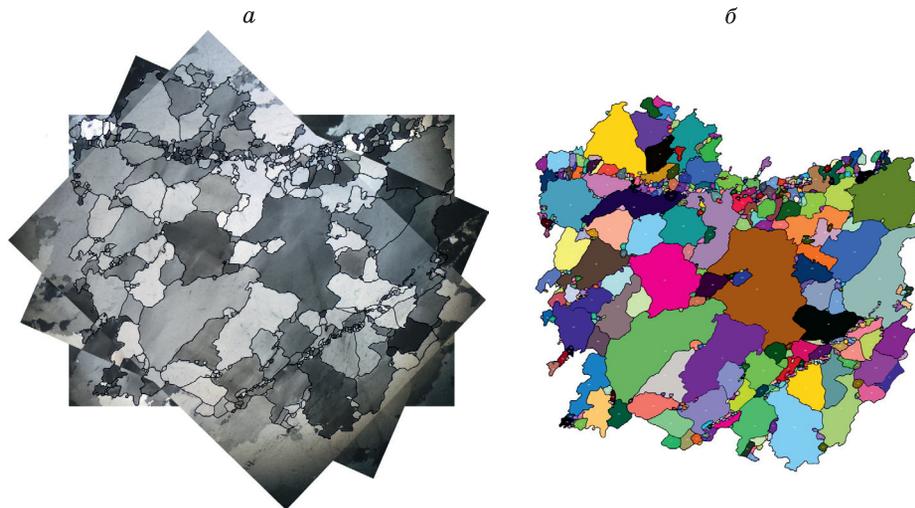


**Рис. 10.** СЭМ изображение: *а* – зонального турмалина в кварце пр. 1584; *б* – сростка кристаллических индивидов турмалина в пр. 1584.

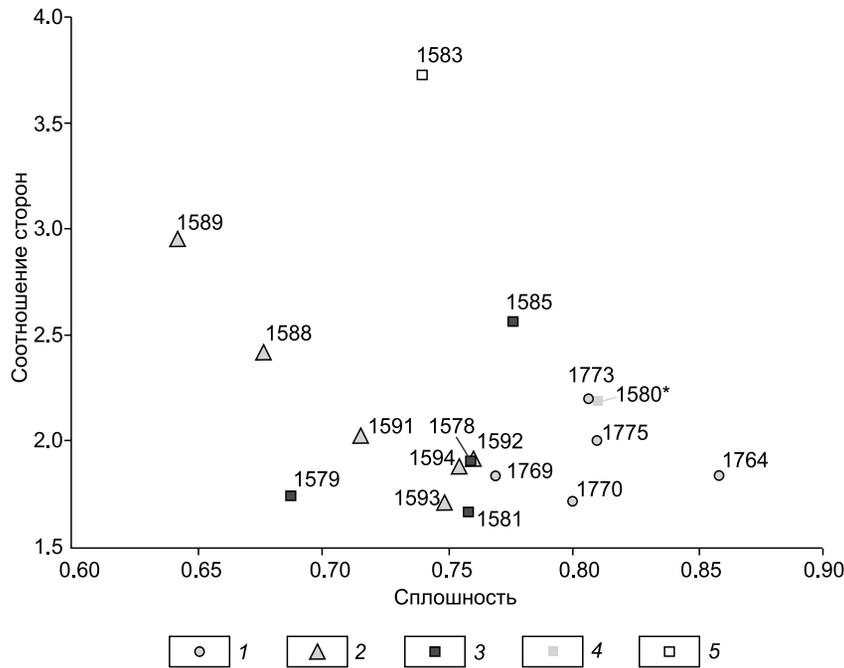
чешуйчатый мусковит. Большая часть минеральных примесей располагается в межзерновом пространстве, но иногда наблюдается и внутри зерен кварца, в частности, в кварце пробы кварцитов 1580 (рис. 9). В рекристаллизованном кварце пробы кварцитов 1583 субмикронные формы минеральных включений не обнаружены. Кроме мусковита, отмечаются редкие включения каолинита, рутила и борнита. Примесь последнего подтверждается повышенными содержаниями меди в отдельных пробах (1587). Кроме того, отмечаются внутризерновые включения зонального и разбитого трещинами турмалина (рис. 10).

Гранулометрический анализ (рис. 11) выполнен на основе изучения 16 шлифов (рис. 12). Получены средние значения площади зерна и средние значения размера зерна кварца в породе (диаметр Ферета). Для

крупных зерен площадью более 0.2 мм<sup>2</sup> получены средние значения факторов формы: соотношение сторон подогнанного эллипса и сплошность (соотношение реального периметра к периметру выпуклой оболочки), а также указана процентная доля площади. В шлифах 1582 (Борщовочный участок) и 1772 (Джидинский участок) границы зерен нечетко выражены из-за интенсивной пластической деформации (милонитизации). В шлифах 1584, 1586, 1774 вскрыты очень крупные зерна, которые больше поля зрения объектива, с редкими мелкими зернами вдоль трещин и блочным погасанием в виде рисунка шахматной доски, которое затрудняет определение границ зерен. Шлифы 1585 и 1775 имеют в основном также очень крупные зерна, но в них была проанализирована часть зерен меньшего размера. Высокая сплош-



**Рис. 11.** Гранулометрический анализ на примере обр. 1770: *а* – наложенные изображения шлифов в поляризационном микроскопе под разными углами с размеченными вручную границами зерен кварца; *б* – зерна в псевдоцветах после обработки в программе ImageJ.



**Рис. 12.** Распределение по форме крупных зерен кварца (более 0.2 мм<sup>2</sup>). Звездочкой отмечен образец, в котором отсутствовали крупные зерна и взяты средние значения по всем зернам. 1–3 – участки: 1 – Джидинский, 2 – Талангуйский, 3 – Борщовочный; 4 – пр. 1580, 5 – пр. 1583.

ность при низких соотношениях сторон для кварца Джидинского участка указывает на меньшую степень рекристаллизации по сравнению с кварцами Борщовочного и Талангуйского участков. Исключение составляет пр. 1583 милонитизированного кварцита Борщовочного участка с характерной порфиروбластической структурой.

### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ УНДИНСКОЙ ЗОНЫ

Геохимические исследования кварцевых жил Ундинской зоны (табл. 1) проведены по небогатенным пробам кварца Талангуйского, Борщовочного и Джидинского участков. Крупных минеральных включений, видимых невооруженным глазом, в изученных образцах не отмечалось. Все минеральные примеси наблюдаются только при петрографических исследованиях с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Исследования проводились на широкий круг химических элементов от главных породообразующих до редких и РЗЭ. Качество кварцевого сырья для разных сфер применения регламентируется и определяется низкими содержаниями ряда элементов. Из них важнейшими считаются Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и Li. Такие элементы, как В и Р, регламентируются кремниевым производством, а высокие содержания Cu, Cr, Ni и Zn критичны для варки кварцевого стекла. Результаты определения содержаний элементов показаны в

табл. 1. Распределение РЗЭ показано на диаграмме и обсуждается в тексте статьи.

Самой распространенной минеральной примесью в кварце Ундинской зоны является мусковит. Этот минерал является главным источником для алюминия и калия в пробах кварца. Составы главных элементов в мусковитах относительно стабильны. Довольно часто отмечаются повышенные содержания оксида титана в мусковитах – до 2.62 % при среднем значении около 0.5 %. Гораздо реже встречаются мусковиты с примесью Na<sub>2</sub>O с содержанием до 0.57 %, K<sub>2</sub>O – до 0.38 % и MnO – до 0.25 %.

В трех пробах кварца Борщовочного участка (1584–1586) отмечается турмалин, который в значительных количествах дает повышенные содержания алюминия, железа, магния, кальция, натрия и реже – марганца. Турмалин этих проб достаточно четко делится на существенно шерловый и существенно дравитовый типы. В первом случае содержание оксидов железа в турмалинах составляет от 15.06 до 15.73 %, а магния не превышает 1.82 %. Во втором случае оксиды магния повышаются до 6.38 (в среднем 5.3 %), а железа снижаются до 9.4 %. В этих же пробах отмечается примесь каолинита, который может увеличивать содержание алюминия, железа и калия в общем балансе химического состава проб кварца.

В пробе 1587 с помощью СЭМ определены микрофазы борнита, которые позволяют объяснить незначительное повышение содержания меди в отдельных пробах Борщовочного участка. Составы достоверно определенных борнитов стабильные.

**Таблица 1.** Содержания элементов примесей в кварце Ундинской зоны (г/т)

№ пробы	Al	Ti	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Li	B	P	Cr	Cu	Ni	Zn	Сумма
1578	298	6.3	97.4	5	20.4	149	27.6	34.5	4.3	0.7	47.1	0.2	0.2	0.2	0.5	691
1579	204	5	98.4	4.9	10.1	158	27.7	29.4	1.1	0.8	78.6	0.3	0.2	0.3	0.5	619
1580	1579	115	378	36.2	30.8	85.6	352	538	6.4	0.9	12.6	0.3	2	0.5	2.1	3139
1581	160	7.9	176	30.7	16.6	217	19.3	10.6	0.5	0.7	138.7	0.9	1.9	0.7	0.7	782
1582	344	31.3	454	2.5	47.5	24.1	16.2	14.8	3.4	0.4	155	0.3	1.2	0.5	0.7	1096
1583	195	3.2	43.3	3.7	11.5	8.1	6.5	11	21.3	1.2	3.1	0.2	0.1	0.2	0.3	309
1584	1650	41.8	1296	8.4	337	51.1	134	178	13.7	90.6	14.7	0.3	1.1	0.4	1.2	3818
1585	3575	151.5	2217	30.8	558	28.1	92.5	1504	80.4	60	10.8	0.2	2.3	0.2	2.9	8314
1586	2083	59.7	2042	13.7	478	75.7	167	34	17.9	72.4	26.8	0.2	1.6	0.4	2.3	5075
1587	65.8	5.4	75.9	2.1	7.7	35.4	8.2	11	0.5	0.3	4	0.2	9.4	0.3	0.2	226
1588	198	7.7	31.6	1.1	11.1	41.1	20.1	11	0.6	0.5	14.1	0.6	1.1	0.2	0.2	339
1589	157	8.9	389	2.4	9.4	51.7	11.7	11	0.5	0.4	17.6	0.3	2.5	0.5	0.3	663
1590	123	8.7	31.1	1.2	13.1	28.9	25.7	11	1	0.7	2.3	0.4	1.9	0.2	0.1	249
1591	41.8	3.1	11.5	0.2	2.2	8.7	9.4	11	0.7	0.2	1.3	1	0.3	0.2	0.1	92
1592	72	5.6	392	0.4	2.2	13.8	15.8	11	0.7	0.5	0.9	0.1	0.2	0.3	0.2	516
1593	122	10.6	31.2	1.2	9	33.7	64.2	11	1.2	0.8	3.5	0.2	0.3	0.2	0.2	289
1594	75.8	9.8	26.2	1.4	225	453	28.2	11	1	0.3	1.8	0.1	0.2	0.1	0.3	834
1764	108	2.12	12	2.7	5.9	10	11.8	41	0.34	0.89	9.2	0.1	0.13	0.11	0.11	204
1770	45.9	2.95	8	0.6	2.1	13	11.8	18	0.38	0.34	2.7	0.13	0.19	0.15	0.09	106
1772	52.2	1.19	10	0.5	3.7	63	6.3	17	0.24	0.81	4.9	0.14	0.22	0.14	0.28	161
1774	187	5.36	124	9.7	7.7	88	27.7	44	3.72	0.7	37	0.24	0.15	0.33	1.05	537
1775	173	4.85	62	0.7	10.9	18	26.3	61	0.47	1.08	119	0.1	0.12	0.15	0.25	478
Ж-175	3600	40	250	3	20	800	500	100	–	–	–	–	1	–	–	5314

Примечание. Анализы выполнены в ИГХ СО РАН методом ИСП-МС, аналитик В.Ю. Пономарева. Результаты по пр. Ж-175 исходного жильного гранулированного кварца Кыштымского месторождения из работы [Минералургия..., 1990] представлены для сравнения. Прочерк – нет данных.

Микрофазы минералов, таких как хлорит, рутил и титанит, отмечаются в единичных зернах и значительно повлиять на состав валовых проб кварца не могут.

Удаление значительной части минеральных примесей при обогащении вполне возможно, и полученные предварительные данные в сравнении с исходным кварцем Кыштымского месторождения (см. табл. 1) позволяют сделать заключение о высоком качестве кварцевого сырья всех участков Ундинской зоны.

## ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Традиционными термобарогеохимическими методами исследования были изучены флюидные включения в двух образцах жильного кварца Борщовочного и Талангуйского участков. Наблюдались двухфазные водно-солевые, трехфазные углекислотно-водные включения, а также темные углеводородные включения и темные пленки вдоль границ зерен (рис. 13). Максимальный размер флюидных включений составляет 10 мкм. В образце 1584 (Борщовочный участок) (см. рис. 13) изучены семь трехфазных углекислотно-водных включений. По данным термометрии, интер-

вал температур гомогенизации трехфазных включений варьируется от 230 до 270 °С. Криометрические исследования показали, что углекислота в углекислотно-водных включениях замерзает при температурах –97...–95 °С. Температура гомогенизации в газовую фазу CO<sub>2</sub> от 31 до 31.5 °С. При расчете изохор и давлений использовалась наибольшая температура – 31.1 °С, так как это максимально возможная температура в рамках модели. Плавление клатрата растворов включений находится в интервале температур от 7.2 до 7.4 °С, а концентрация солей оценивается в диапазоне от 5.1 до 5.4 мас. % NaCl-экв. по системе H<sub>2</sub>O–NaCl–CO<sub>2</sub> [Steele-MacInnis et al., 2018] (табл. 2).

В образце 1592 (Талангуйский участок) встречаются двухфазные водно-солевые включения, которые расположены преимущественно вдоль залеченных трещин и редко образуют скопления. Изучено восемь двухфазных включений. По данным термометрии, интервал температур гомогенизации флюидных включений варьируется от 205 до 215 °С. Криометрические исследования показали, что первое заметное плавление льда замороженного раствора включений происходит при температурах –21...–26 °С, что близко к температурам плавления эвтектик водно-соле-

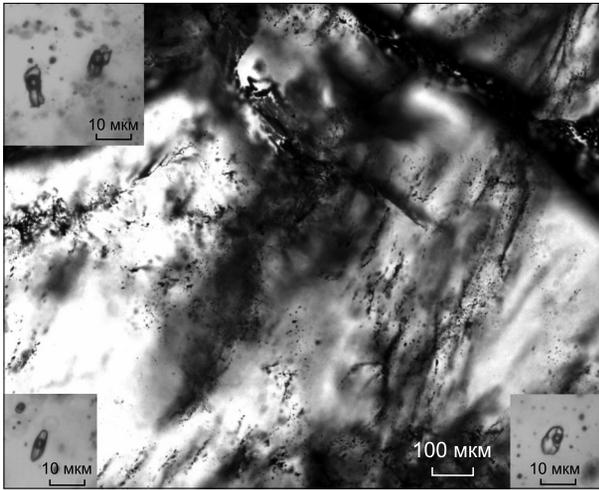


Рис. 13. Флюидные включения в кварце обр. 1584.

вых систем, содержащих NaCl, KCl [Борисенко, 1982]. Плавление льда растворов включений находится в интервале температур от  $-1.5$  до  $-0.5$  °C, общая концентрация солей оценивается в диапазоне от 0.9 до 2.6 мас. % NaCl-экв. по системе  $H_2O-NaCl$  [Steele-MacInnis et al., 2012] (табл. 3).

Таким образом, флюидные включения Борщовочного участка отличаются по минимальным условиям захвата (230–270 °C при 0.99–1.26 кбар) от Талангуйского (205–215 °C при 0.017–0.021 кбар).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геохимические исследования кварцевых жил Ундинской зоны позволяют предварительно отнести большую часть из них к высокотемпературному гидротермальному типу, но с несколько различными источниками вещества (рис. 14, 15).

**Жилы Талангуйской зоны** по классификации [Schrön et al., 1988], группируются в поле розового гидротермального кварца. По классификации [Götze, 2009], эта часть поля соответствует зоне кварца из пегматитов. Большая часть изучаемых проб кварца и кварцитов Ундинской зоны в значительной степени

(особенно Талангуйского участка) подверглись перекристаллизации, и примесные элементы из них могли выноситься либо в участки с их низким содержанием, либо в приконтактовые части жил с вмещающими породами.

На возможную связь с процессами пегматитообразования жильного кварца Талангуйского участка указывают изотопные метки этих пород (8.8–9.3 ‰  $\delta^{18}O$ , табл. 4).

При изучении кварцевожильных тел, в том числе и испытывавших перекристаллизацию, наиболее информативными являются РЗЭ, которые зачастую наследуют распределение элементов в протолите [Поленов и др., 2013]. Типичным распределением для гидротермальных кварцевых жил является незначительное превышение легких РЗЭ над тяжелыми, практически ровное или с небольшим наклоном, расположение тяжелых РЗЭ, как правило, выраженный отрицательный европиевый минимум, хотя в некоторых случаях он может отсутствовать или быть положительным [Светова и др., 2012; Поленов и др., 2013]. Похожая картина распределения РЗЭ описана в работе [Götze, Lewis, 1994] для высокочистых кварцевых песков со смешанными источниками вещества.

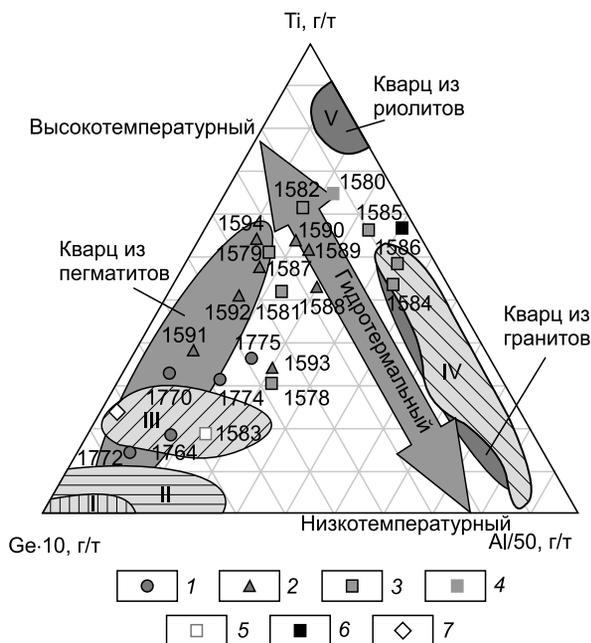
Низкие содержания (в среднем 400 г/т при диапазоне от 90 до 833 г/т) регламентируемых для высокочистых разновидностей кварца Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Cu, Li, B и P в валовых пробах (рис. 16) указывают на преимущественно монокварцевый состав жил Талангуйского участка. Незначительные повышения содержания Mg и Ca могут указывать на присутствие карбонатного вещества в отдельных пробах, вероятно, в виде мелких прожилков, а наряду с повышенным содержанием фосфора могут свидетельствовать о концентрации в виде апатита. Анализ соотношения редких и РЗЭ в кварце Талангуйского участка и сопоставление с хорошо изученными карельскими [Светова и др., 2012] и уральскими [Поленов и др., 2013] кварцами указывает на их гидротермальный генезис и связь с магматогенными породами. Кварцевые зерна на этом участке наиболее деформированы и имеют наименьшую сплошность,

Таблица 2. Параметры флюидных включений в кварце (обр. 1584)

$T_{пл. \text{клатрата}}$	$T_{гом. CO_2}$	$T_{гом.}$	Объем пузыря, %	Соленость, мас. % NaCl-экв.	$CO_2$ , мол. %	Изохора, $dP/dT$ , бар/°C	$P$ , бар
°C							
7.2	31.1	270	25	5.4	8	12.9	1259
7.4	31	230	19	5.1	5.8	15.5	987

Таблица 3. Параметры флюидных включений в кварце (обр. 1584)

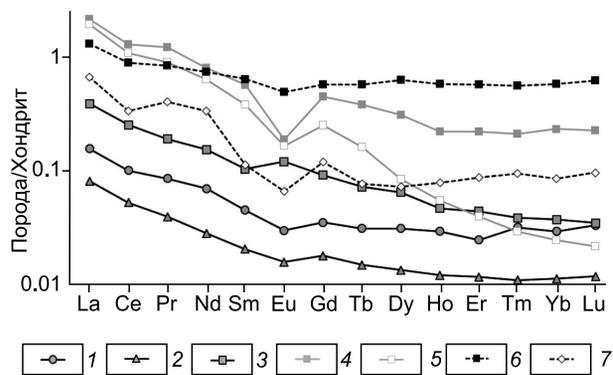
$T_{пл. \text{льда}}$	$T_{гом.}$	Соленость, мас. % NaCl-экв.	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Изохора, $dP/dT$ , бар/°C	$P$ , бар
°C					
-1.5	215	2.6	0.87	14.9	21
-0.5	205	0.9	0.87	15.4	17



**Рис. 14.** Тройная дискриминационная диаграмма пегматитового и магматогенного кварца по [Schrön et al., 1988, поля I–V). Поля I–III соответствуют кварцам из пегматитов, поле IV – кварцу из гранитов, поле V – кварцу из риолитов. Диаграмма дополнена данными (по [Götze, 2009], темно-серые поля с подписями). Поле V полностью совпадает у обоих авторов. 1 – кварцы Джидинского участка; 2 – кварцы Талангуйской зоны; 3 – кварцы Борщовочной зоны; 4 – проба кварцита 1580 Борщовочной зоны; 5 – проба кварцита 1583 Борщовочной зоны; 6 – кварцитопесчаники Черемшанского месторождения; 7 – хемогенно-осадочные кварциты Восточного Саяна (суперкварциты).

что указывает на динамическую перекристаллизацию в режиме миграции границ зерен (см. рис. 12).

Для жил Борщовочного участка источниками вещества могут быть породы разных фаз и протолитов гранитоидов борщовочного гранитоидного комплекса и метаморфических пород [Рутштейн и др., 2015]. В составе первой фазы комплекса описаны гнейсовидные граниты, гранодиориты и граносиениты. Кроме того, отмечается насыщенность пород первой фазы скиалитами и ксенолитами метаморфических сланцев и гнейсов, реже амфиболитов, кварцитов и мраморов, величиной от долей метра до сотен метров по мощности и от десятков метров до многих километров в длину. Иногда встречаются реликтовые включения плагиогнейсов, кристаллических сланцев основного состава, плагиоклазитов, плагиогранитов и гранитогнейсов. К особенностям минерального состава гранитов второй фазы относится преобладание ортоклаза над плагиоклазом, присутствие магнезиального биотита, позднего альбит-олигоклаза, повышенная монацитонность, развитие мусковита, турмалина, апатита, флюорита [Рутштейн и др., 2015]. Такой разнообразный состав вме-

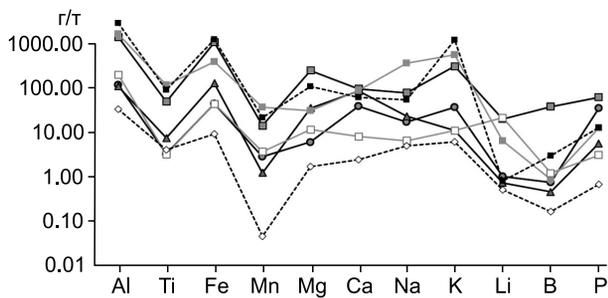


**Рис. 15.** Диаграмма распределения РЗЭ в кварцах Ундинской зоны в сравнении с кварцитопесчаниками Черемшанского месторождения и хемогенно-осадочными кварцитами Восточного Саяна (суперкварциты). Нормировано по [Evensen, 1978]. 1–3 – участки: 1 – Джидинский, 2 – Талангуйский, 3 – Борщовочный; 4 – пр. 1580; 5 – пр. 1583; 6 – кварцитопесчаники Черемшанского месторождения; 7 – суперкварциты.

щающих пород создает предпосылки для формирования гидротермальных жил различающегося минерального и элементного составов. Предварительная оценка по соотношению алюминия, титана и германия в кварце (см. рис. 14) кварцевых жил позволяет сделать заключение о генетических особенностях кварца Борщовочного участка. Часть жил, хотя и расположены в поле гидротермального кварца, несколько сдвигаются в зону пегматитового типа вследствие частичной перекристаллизации кварца. Три пробы (1584–1586) при значительной обогащенности минеральными включениями (в первую очередь турмалином и мусковитом), наоборот, тяготеют к зоне кварца из гранитоидов. Еще две пробы (1580 и 1583), отобранные в пределах Борщовочного участка по петрографическим (наименьший размер зерен в породе или ее части) и геохимическим критериям, можно отнести к седиментогенным кварцитам.

**Таблица 4.** Результаты определения изотопного состава кислорода в пробах кварца Ундинской зоны

№ пробы	Порода	$\delta^{18}\text{O V-SMOW}$ , ‰
1578	Гранулированный кварц	9.0
1582	Первично-зернистый, частично катаклазированный кварц	10.9
1583	Частично милонитизированный кварцит	13.2
1586	Катаклазированный кварц	12.2
1587	Гранулированный кварц	9.3
1588	»	8.8
1764	»	11.7
1770	»	10.0
1772	»	10.9
1775	»	9.7



**Рис. 16.** Содержание нормируемых кварцевым производством элементов в кварцах Ундинской зоны в сравнении с кварцитопесчаниками Черемшанского месторождения и хемогенно-осадочными кварцитами Восточного Саяна (суперкварциты). Усл. обозн. см. на рис. 15.

Магматогенный источник вещества для кварцевых жил Борщовочного участка определяется не только типичными для кислых пород метками тяжелого кислорода (полученные значения  $\delta^{18}\text{O}$  лежат в диапазоне 9.0–11.7 ‰) – главным критерием выделения этого типа стали повышенные в несколько раз содержания ряда некогерентных элементов, типичных для поздних кислых дифференциатов [Козлов и др., 2008], таких как Be, K, Rb, Cs, Sr, Pb и Sn. Этот тренд более выражен для образцов с крупными минеральными включениями турмалина и слюды, в том числе литийсодержащих.

**Кварциты Борщовочного участка.** Для терригенно-осадочных пород и кварцитов, в частности, характерны высокие содержания РЗЭ (см. рис. 15) с выраженными цериевым и европиевым минимумами [Петрова и др., 1995; Макрыгина, 2011] и наиболее характерным интервалом  $\delta^{18}\text{O}$  – от 10 до 15 ‰ [Magaritz, Taylor, 1976; Покровский, 2001; Аюржанаева и др., 2020]. По сравнению с магматогенным кварцем, изотопные исследования кварца из пр. 1583 показали наиболее утяжеленную метку  $\delta^{18}\text{O}$  из всех изученных образцов и равную 13.2 ‰, что подтверждает ее генетическую связь с кварцитами. По уровню РЗЭ пробы 1580 и 1583 показали самые высокие содержания, сопоставимые с кварцитопесчаниками Черемшанского месторождения (Республика Бурятия). При этом в пр. 1583, по сравнению с пр. 1580, отмечается значительное сокращение тяжелой части РЗЭ (см. рис. 15). Дифференциация содержаний РЗЭ объясняется метаморфизмом породы [Балашов, 1976]. Содержания основной части редких и породообразующих (см. рис. 16) элементов от проб 1580 к 1583 также снижается.

Опираясь на изотопные и геохимические данные (см. рис. 15, 16), кварцевые тела Борщовочного участка можно разделить на две группы: гидротермально-магматогенную (Борщовочный и Борщовочный с турмалином) и седиментогенную (кварциты, на диаграммах пробы 1580 и 1583).

Несмотря на близкие геохимические характеристики кварцитов проб 1580 и 1583, петрографические исследования не позволяют дать окончательный ответ на вектор преобразований этих пород. Вполне вероятно, что в кварцитах происходит рост зерен кварца (пробы от 1580 к 1583). Изначально образуются зерна кварца линзовидной формы с размерами  $2.3 \times 0.5$ – $3.4 \times 0.7$  мм, по длинной оси ориентированные в одном направлении (40 % площади шлифа) (см. рис. 7, б). По краям этих зерен находится исходный микрозернистый кварцевый агрегат, составляющий 25 % площади. В этом микрозернистом кварцевом агрегате выделяются более и менее крупные зерна кварца. Крупные зерна имеют размер  $0.3 \times 0.1$  мм, удлиненную форму и слабоволнистое погасание. Мелкие зерна – изометричной формы с размерами от  $0.03 \times 0.02$  мм с ровными границами и прямым погасанием. В конечном итоге образуются крупные зерна размером  $11 \times 5$  мм, неправильной формы с блочноволнистым погасанием, пересеченные беспорядочно расположенными трещинами с раздробленным микрозернистым кварцем (35 % площади шлифа) (см. рис. 7, а), и в результате этих процессов происходит очистка породы от примесей. Не исключается и процесс, когда очистка породы от примесей происходит при грануляции исходно крупнозернистого, но при этом обладающего гораздо большим содержанием примесей кварцита с формированием микрозернистого кварцита (см. рис. 6).

Кварцевые зерна на Борщовочном участке имеют средние значения формы и сплошности зерен (см. рис. 12). Исключение составляют кварциты пр. 1583, которые отличаются от всех остальных кварцев Ундинской зоны и, вероятно, испытали особый режим перекристаллизации, возможно, многоэтапный.

**Жилы Джидинского участка,** сформировавшиеся в метаморфитах урульгинского и чонгульского комплексов, тяготеют к области пегматитового кварца. Кроме того, изотопные составы кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$  – 9.7–11.7 ‰) указывают на возможный пегматитовый или вообще кислый источник вещества для этих пород. Кварцевые жилы Джидинского участка по распределению как РЗЭ, так и редких элементов похожи на жилы Талангуйского, но с более высокими их содержаниями. Относительно повышенные содержания циркония, гафния и тяжелых РЗЭ могут указывать на высокую составляющую терригенно-осадочных пород в протолите для этих кварцев.

Кварцевые зерна на Джидинском участке имеют наименее деформированную форму и наибольшую сплошность зерен, что указывает на слабую динамическую перекристаллизацию (см. рис. 12).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые изучены минералогические особенности, химический состав и условия образования

кварца Ундинской зоны обрамления борщовочных гранитов и среди них выявлены его жильные разновидности, а также спорадически встречающиеся кварциты. Сравнительный анализ содержаний элементов-примесей в небогатом кварцевом материале показал, что его рассмотренные проявления могут представлять промышленный интерес и подтверждают рекомендации предшественников о возможном высоком качестве кварцевого сырья.

2. Главными минеральными примесями в кварце Ундинской зоны являются мелкочешуйчатый мусковит, гидроксиды железа, в том числе гетит, турмалин и редкие знаки рудного минерала. Несмотря на различия в содержаниях и соотношениях РЗЭ, редких и породообразующих элементов, пространственная близость развития полей кварцевых жил Ундинской зоны допускает их формирование и последующую перекристаллизацию в результате общих тектономагматических процессов.

3. Сопоставление геохимии главных, редких и РЗЭ элементов с изотопным составом кислорода в кварце различных генетических типов позволяют оценить источники вещества для кварцевых жил и кварцитов и провести их типизацию. Источниками вещества для кварцевых жил Борщовочного, Джидинского и Талангуйского участков являлись разные метаморфические, метаморфогенно-осадочные и магматические кислые породы, в том числе турмалинсодержащие.

4. Кварцевые жилы Талангуйского и Джидинского участков содержат меньше примесей, чем жилы Борщовочного участка. Различия в элементных составах кварцитов Борщовочного участка, вероятнее всего, связаны с процессом перекристаллизации с укрупнением зерна и сокращением количества трещин и межзерновых границ.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН в рамках государственного задания по проекту № 0284-2021-0004 (ИГХ СО РАН).

## ЛИТЕРАТУРА

Аюржанаева Д.Ц., Федоров А.М., Мазукабзов А.М., Непомнящих А.И., Очирова Э.А., Посохов В.Ф. (2020). Механизмы формирования химически чистых кварцитов Бурал-Сардыкского месторождения // Геология и геофизика, т. 61, № 10, с. 1316–1330, DOI: [10.15372/GiG2020106](https://doi.org/10.15372/GiG2020106), EDN: ANIBRM.

Балашов Ю.А. (1976). Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 267 с.

Борисенко А.С. (1982). Анализ солевого состава растворов газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М., Недра, с. 37–47.

Гордиенко И.В., Метелкин Д.В., Ветлужских Л.И. (2019). Строение Монголо-Охотского складчатого пояса и проблема выделения Амурского микроконтинента // Геология и геофизика, т. 60, № 3, с. 318–341, DOI: [10.15372/GiG2019018](https://doi.org/10.15372/GiG2019018), EDN: ZABEIX.

Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В. (2009). Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений, т. 51, № 6, с. 560–567.

Козлов В.Д., Спиридонов А.М., Чокан В.М. (2008). Петролого-геохимические особенности и металлогеническая специализация гранитоидов Любавинско-Хапчерангского рудного района Центрального Забайкалья // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАН, № 7 (33), с. 4–17.

Макрыгина В.А. (2011). Геохимия отдельных элементов: учеб. пособие / Ред. В.С. Антипин. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 195 с.

Минералургия жильного кварца. (1990). Кыштым. горн.-обогат. комб.; под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М., Недра, 294 с.

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.П., Сокольников Ю.В., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю. (2017). Оптическое кварцевое стекло на основе суперкварцитов Восточных Саян // Физика и химия стекла, т. 43, № 3, с. 288–295.

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. (2018). Оптическое кварцевое стекло из кварцитов Восточного Саяна // Физика и химия стекла, т. 44, № 2, с. 169–177.

Петрова З.И., Конева А.А., Макрыгина В.А. (1995). Геохимия кварцитов и кварцитосланцев Приольхонья и о-ва Ольхон // Геохимия, № 10, с. 1448–1464.

Покровский Б.Г. (2001). Коровая контаминация мантийных магм (по данным изотопной геохимии): автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., 47 с.

Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Савичев А.Н. (2013). Редкоземельные элементы в кварцево-жильных образованиях Урала и их индикаторная роль // Литосфера, № 2, с. 105–119.

Рутштейн И.Г., Богач Г.И., Винниченко Е.Л., Негода В.М., Пинаева Т.А., Шивохин Е.А., Карасев В.В., Надеждина Т.Н. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 200 000. Издание второе. Серия Приаргунская. Лист М-50-III – Балей. Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ.

Светова Е.Н., Светов С.А., Данилевская Л.А. (2012). Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды Карельского научного центра РАН, № 3, с. 137–144.

Юргенсон Г.А. (2009). Минеральное сырье Забайкалья. Часть II. Неметаллическое сырье. Книга 1. Топливно-энергетическое, горно-химическое и горно-техническое сырье. Чита, Поиск, 308 с.

Яловик Л.И., Татаринцев А.В. (2005). Гранулированный кварц – новый прогнозируемый вид минерального сырья Читинской области // Изв. вузов. Геология и разведка, № 2, с. 49–53.

Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. (1978). Rare-earth abundances in chondritic meteorites // Geochim. Cosmochim. Acta, v. 42 (8), p. 1199–1212, DOI: [10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X).

Götze J. (2009). Chemistry, textures and physical properties of quartz-geological interpretation and technical application // Mineral. Mag., v. 73 (4), p. 645–671, DOI: [10.1180/minmag.2009.073.4.645](https://doi.org/10.1180/minmag.2009.073.4.645).

Götze J., Lewis R. (1994). Distribution of REE and trace elements in size and mineral fractions of high-purity quartz sands // Chem. Geol., v. 114 (1–2), p. 43–57, DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90040-X).

- Halas S., Bojar A.-V., Peryt T.M. (2015).** Oxygen isotopes in authigenic quartz from massive salt deposits // *Chem. Geol.*, v. 402, p. 1–5, DOI: [10.1016/j.chemgeo.2015.02.034](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.02.034).
- Kenny R. (2017).** Oxygen and hydrogen isotope ratios of chert from the Sixtymile Formation in Grand Canyon National Park, USA: a warm palaeoclimate, freshwater deposit // *Acta Geochim.*, v. 36 (2), p. 250–259, DOI: [10.1007/s11631-016-0138-y](https://doi.org/10.1007/s11631-016-0138-y).
- Magaritz M., Taylor H.P. Jr. (1976).** Oxygen, hydrogen and carbon isotope studies of the Franciscan formation, Coast Ranges, California // *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 40 (2), p. 215–234, DOI: [10.1016/0016-7037\(76\)90179-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90179-4).
- Müller A., Ihlen P.M., Snook B., Larsen R.B., Flem B., Bingen B., Williamson B.J. (2015).** The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway: Petrogenetic and economic implications // *Econ. Geol.*, v. 110 (7), p. 1737–1757, DOI: [10.2113/econgeo.110.7.1737](https://doi.org/10.2113/econgeo.110.7.1737).
- Perry E.C. Jr., Tan F.C. (1972).** Significance of Oxygen and Carbon Isotope Variations in Early Precambrian Cherts and Carbonate Rocks of Southern Africa // *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83 (3), p. 647–664, DOI: [10.1130/0016-7606\(1972\)83\[647:SOOACI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[647:SOOACI]2.0.CO;2).
- Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. (2012).** NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // *Nat. Methods*, v. 9 (7), p. 671–675, DOI: [10.1038/nmeth.2089](https://doi.org/10.1038/nmeth.2089).
- Schrön W., Schmädicke E., Thomas R., Schmidt W. (1988).** Geochemische Untersuchungen an Pegmatitquarzen // *Z. Geol. Wiss.*, v. 16, p. 229–244.
- Soong R., Blattner P. (1986).** Biterminal autigenic <sup>18</sup>O-enriched quartz in subbituminous coal seam, Charleston, New Zealand // *N. Z. J. Geol. Geophys.*, v. 29 (2), p. 141–145, DOI: [10.1080/00288306.1986.10427530](https://doi.org/10.1080/00288306.1986.10427530).
- Steele-MacInnis M. (2018).** Fluid inclusions in the system H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub>: An algorithm to determine composition, density and isochore // *Chem. Geol.*, v. 498, p. 31–44, DOI: [10.1016/j.chemgeo.2018.08.022](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.08.022).
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. (2012).** HOKIEFLINCS\_H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the *PVTX* properties of H<sub>2</sub>O-NaCl // *Comput. Geosci.*, v. 49, p. 334–337, DOI: [10.1016/j.cageo.2012.01.022](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022).
- Stewart R.B., Neall V.E., Sayers J.K. (1986).** Origin of quartz in selected soils and sediments, North Island, New Zealand // *N. Z. J. Geol. Geophys.*, v. 29 (2), p. 147–152, DOI: [10.1080/00288306.1986.10427531](https://doi.org/10.1080/00288306.1986.10427531).