

Льдистый кварц и гондиты Борусского офиолитового пояса (Западные Саяны)

А. Ю. Кисин¹, С. Ю. Батурин², В. В. Григорьев³, Д. А. Озорнин¹, Д. А. Ахмедов¹

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: kissin@igg.uran.ru

²ООО “ТомГДК”, 662732, Красноярский край, Шушенский район, п. Красный Хутор, ул. Дорожная, 1

³Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Поступила в редакцию 17.06.2025 г., принята к печати 09.07.2025 г.

Актуальность работы – льдистый кварц и гондиты Борусского офиолитового пояса (Западные Саяны) представляют практический интерес как ювелирно-поделочное сырье и технический камень различного назначения, но слабо изучены. *Цель работы* – исследовать структурно-вещественный состав льдистого кварца и гондитов Борусского офиолитового пояса и возможность их применения в ювелирном деле и как технический камень. *Методология и методы исследования* – образцы и пробы льдистого кварца и гондитов с Западных Саян предоставлены ООО “ТомГДК”. Структура и минеральный состав породы определялись оптическими методами в прозрачных шлифах. Химический состав породы определен рентгенофлуоресцентным анализом, химический состав отдельных минералов изучен методами сканирующей электронной микроскопии, на микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80. Рентгенометрические исследования проб проведены в целях качественного определения минерального состава микрокварцита и гондита. Анализы выполнены в ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). *Результаты*. Льдистый кварц – массивный мелкозернистый кварцит почти мономинерального состава, но часто отмечается незначительная примесь хлорита, фторапатита, кальцита. Лучшие разности пропускают свет на глубину до 10 см и более. Гондиты представлены теми же микрокварцитами грубополосчатой текстуры; отличаются обильной вкрапленностью альмандин-спессартина. Есть признаки сдвиговых деформаций, рекристаллизации и перекристаллизации, обусловивших образование полосчатости и мелких складок волочения. Декоративные качества и механические свойства позволяют использовать льдистый кварц и гондит для изготовления ювелирных изделий, глиптики, сувенирной продукции. Наиболее чистый (свободный от минеральной примеси) льдистый кварц по характеристикам близок к дорогостоящему абразивному материалу типа “камень Арканзас”. *Выводы*. Льдистый кварц, гондиты и черные микрокварциты Борусского офиолитового пояса по художественно-декоративным качествам и механическим свойствам могут использоваться для изготовления ювелирных изделий, глиптики, сувенирной продукции и в качестве облицовочного камня. Льдистый кварц, свободный от минеральной примеси, может применяться в качестве абразивного материала типа “камень Арканзас”.

Ключевые слова: микрокварцит, гондит, льдистый кварц, ювелирно-поделочные камни, облицовочные камни, абразивные камни, Западные Саяны

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № 123011800011-2

Icy quartz and gondites of the Borussian ophiolite belt (Western Sayan Mountains)

Alexander Yu. Kissin¹, Sergey Yu. Baturin², Valery V. Grigoriev³, Danil A. Ozornin¹, Dmitry A. Akhmedov¹

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mail: kissin@igg.uran.ru

²Samotsvety LLC, 1 Dorozhnaya st., Krasny Khutor village, Shushensky district, Krasnoyarsk region 662732, Russia

³Ural State Mining University, 30 Kuibyshev st., Ekaterinburg 620144, Russia

Received 17.06.2025, accepted 09.07.2025

Для цитирования: Кисин А.Ю., Батурин С.Ю., Григорьев В.В., Озорнин Д.А., Ахмедов Д.А. (2026) Льдистый кварц и гондиты Борусского офиолитового пояса (Западные Саяны). *Литосфера*, **26**(1), 189-204. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-189-204>. EDN: KLBBC

For citation: Kissin A.Yu., Baturin S.Yu., Grigoriev V.V., Ozornin D.A., Akhmedov D.A. (2026) Icy quartz and gondites of the Borussian ophiolite belt (Western Sayan Mountains). *Lithosphere (Russia)*, **26**(1), 189-204. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-189-204>. EDN: KLBBC

Background. Icy quartz and gondites of the Borussian ophiolite belt (Western Sayan Mountains) are promising as jewelry and ornamental raw materials and industrial stone materials for various purposes; however, these deposits have been poorly studied. *Aim.* To investigate the structural and material composition of icy quartz and gondites of the Borussian ophiolite belt and to determine their applicability in jewelry production and as industrial stone materials. *Materials and methods.* Samples of icy quartz and gondites from the Western Sayan Mountains were provided by TomGDK LLC. The structure and mineral composition of rocks were determined by optical methods in polished thin sections. The chemical composition of samples was determined by X-ray fluorescence analysis (XFA). Individual minerals were studied by scanning electron microscopy using a Jeol JSM-6390LV microscope equipped with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy dispersive attachment. The mineral composition of microquartzite and gondite was assessed by X-ray analysis performed at the Common Use Center “Geoanalyst” of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg). *Results.* Icy quartz is a massive, fine-grained quartzite of almost monomineral composition with minor admixtures of chlorite, fluorapatite, and calcite. The best varieties transmit light to a depth of 10 cm or greater. Gondites are represented by the same microquartzites of a coarse-banded texture; they are characterized by abundant inclusions of almandine-spessartine. These exhibit signs of shear deformations and recrystallization, which caused the formation of banding and small folds of drawing. The ornamental and mechanical properties render icy quartz and gondite suitable for jewelry, glyptic, and souvenir production. The purest (free from mineral impurities) icy quartz is similar in its characteristics to such an expensive abrasive material as Arkansas stone. *Conclusions.* Due to their decorative qualities and mechanical properties, icy quartz, gondites, and black microquartzites of the Borussian ophiolite belt can be used for jewelry, glyptic, and souvenir production. Icy quartz, free from mineral impurities, can be used as an abrasive material, such as Arkansas stone.

Keywords: *microquartzite, gondite, icy quartz, jewelry and ornamental stones, abrasive stones, Western Sayan*

Funding information

The research was carried out within the framework of the State Assignment of the IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 123011800011-2

ВВЕДЕНИЕ

На рынке цветных ювелирных камней хорошо известно Борусское месторождение жадеита (Западные Саяны), подробно описанного Н.Л. Добрецовым (Добрецов, 1963; Добрецов, Татаринов, 1983). Кроме жадеита, геологами ПО “Байкал-варцсамоцветы” в период 1975–1995 гг. здесь также изучались проявления нефрита, лиственита, офи-кальцита, серпентинита, демантоида и других поделочных и драгоценных камней (рис. 1). В настоящее время вновь проявился интерес к ювелирным и поделочным камням региона. В связи с этим геологами “ТомГДК” на участках “Большекашкаретский”, “Перевальное месторождение” (Шушенский район, Красноярский край, в 44 км к ЮВ от п. Красный Хутор, лист N-46-XXVI) начаты геолого-разведочные работы на микрокварциты типа льдистый кварц, черный микрокварцит, гондит и др.

На участке “Большекашкаретский” большой интерес представляют тела микрокварцитов, которые по структурно-вещественным характеристикам соответствуют понятиям “льдистый кварц” и “гондит” (рис. 2). Однако строгого определения понятия “льдистый кварц” в справочной литературе нет, хотя этот термин иногда применяется при

описании некоторых разновидностей микрокварцита, используемых в качестве ювелирно-поделочных камней (Киевленко, 2001). Как оказалось, в научной литературе микрокварцит льдистый кварц практически не описан. В СССР так называли микрокварциты с месторождения жадеита Итмурунды в Восточном Казахстане (Москалева, 1960; Ермолов, 2013). От обычных микрокварцитов льдистый кварц Итмурунды отличался высоким светопропусканием, что и определило его название. Льдистый кварц, вероятно, может представлять интерес как источник особо чистого кварца, ювелирно-поделочный камень, абразивный материал (типа “Арканзасский камень”), что и обусловило данное исследование.

В Инструкции по попутным поискам (1979) дано краткое определение: “Кварц льдистый: белый, светло-серый. Просвечивающий в тонких сколах до 5 мм, окраска равномерная, блочность 100 × 100 × 50 – сорт I”.

Гондитом называют метаморфическую горную породу, состоящую из мелкозернистого кварца с идиобластами спессартина; в качестве примеси могут выступать кальцит, родохрозит, родонит, амфибол и акцессорные минералы апатит и рутил. В научной литературе они освещены хорошо, но

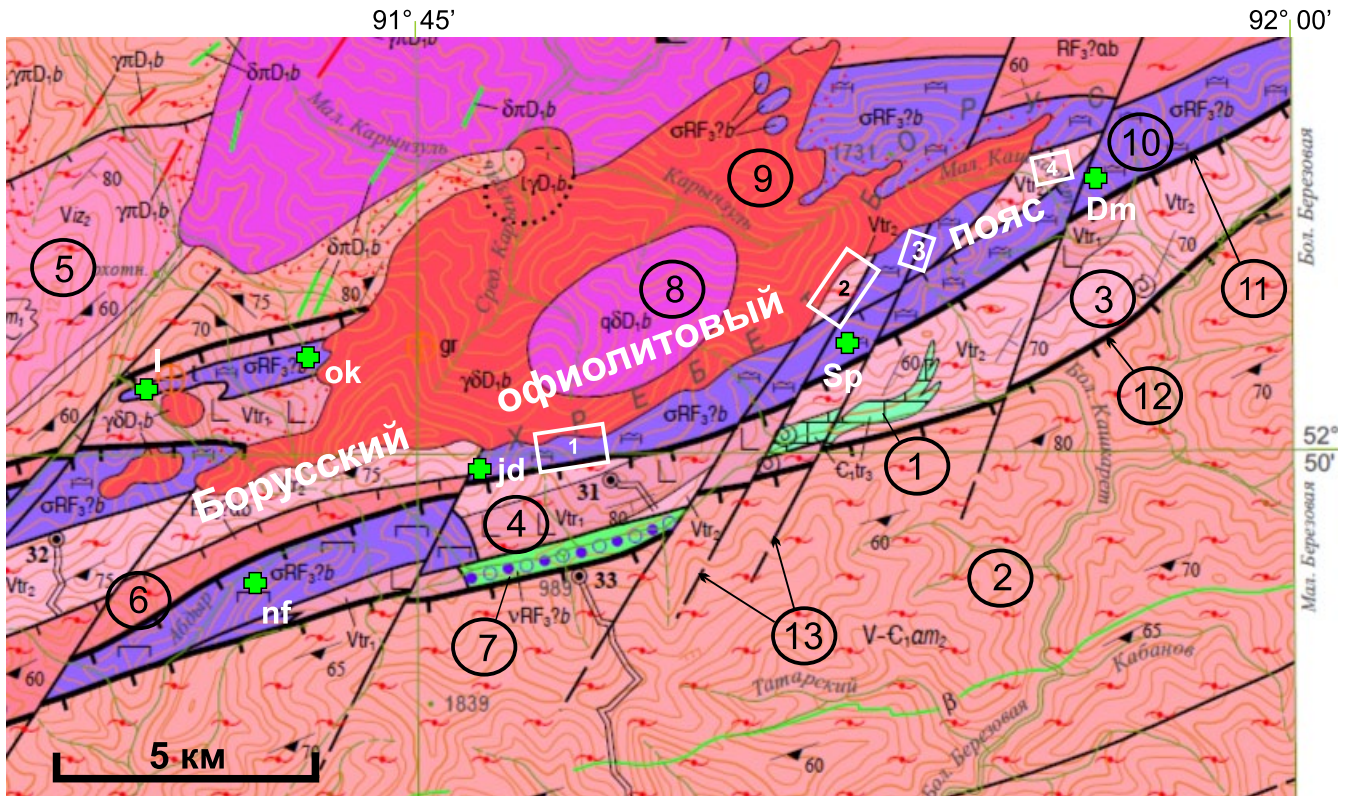


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Борусского офиолитового пояса с месторождениями и проявлениями камнесамоцветного сырья (Шаталина и др., 2019).

Цифры в кружках: 1 – верхнетурунташская подтолща (известняки мраморизованные, доломитизированные и доломиты); 2 – верхнеамыльская подсвита (парасланцы серицит-хлорит-карбонатные); 3 – среднетурунташская подтолща (сланцы хлорит-серицит-кварцевые, фтаниты, кварциты, metabазальты); 4 – нижнетурунташская подтолща (метабазальты, металавокластиты, сланцы серицит-хлорит-кварцевые углеродистые); 5 – верхнеизербельская подсвита (парасланцы карбонат-серицит-хлоритовые, карбонат-плаггиоклаз-хлоритовые); 6 – абдырская толща (сланцы плаггиоклаз-хлорит-амфиболовые апобазальтовые, хлорит-кварцевые, карбонат-хлорит-углеродистые); 7 – габбро, габбродиориты, диориты; 8, 9 – большепорожский гранитоидный комплекс: 8 – кварцевые диориты, 9 – низкощелочные граниты, граниты, лейкограниты; 10 – верлиты, дуниты, клинопироксениты, серпентиниты; 11, 12 – системы взбросо-надвигов, с крутым (70–80°) Ю-ЮВ падением сместителей: 11 – Северо-Борусская, 12 – Южно-Борусская; 13 – сдвиги. Зеленый крест – проявления и месторождения камнесамоцветного сырья: Dm – демантоид, jd – жадеит, l – листвениит, nf – нефрит, ok – офикальцит, Sp – серпентинит. Белый прямоугольный контур – объекты исследований: 1 – участок Большекашкаретский; 2, 3 – месторождение Перевальное; 4 – участок с черным микрокварцитом.

Fig. 1. Schematic geological map of Borussian ophiolite belt with deposits of precious stones (Shatalina et al., 2019).

In circles: 1 – upper-turuntashian sublayer; 2 – upper-amylian sublayer; 3 – mid-turuntashian sublayer; 4 – lower-turuntashian sublayer; 5 – upper-izerbelian sublayer; 6 – abdyrian layer; 7, 8 – ophiolitic rocks: 7 – gabbro, gabbro-diorite, diorite, 8, 9 – bolsheporozhsky granitoid complex: 8 – quartz diorite, 9 – low-alkaline granite, granite, leucogranite; 10 – verlite, dunite, clinopyroxenite, serpentinite, 11, 12 systems of faults: 11 – Northern Borussian, 12 – Southern Borussian; 13 – shift. Green cross – deposits of precious stones: Dm – demantoid, jd – jadeite, l – listvenite, nf – nephrite, ok – ophiocalcite, Sp – serpentinite. White rectangular frame – objects of study: 1 – Bolshekashkaretsky plot; 2, 3 – Pereval'noe deposit; 4 – black microquartzite plot.

вне ассоциации с льдистым кварцем. Гондит также иногда используется при изготовлении сувенирной продукции.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ РАЙОНА

Борусский офиолитовый пояс, вмещающий данные месторождения и проявления камнесамоцветного сырья, сложен гипербазитами и породами эф-

фузивно-сланцевого комплекса нижнего кембрия, приуроченными к глубинному разлому в Джебашском антиклинории (выступе), сложенном протерозойскими и нижнекембрийскими отложениями. На севере от Минусинского наложенного прогиба Джебашский антиклинорий отделен субширотной зоной разломов; на юге – граничит с Западно-Саянским синклинорием, выполненным отложениями верхнего кембрия – силура.

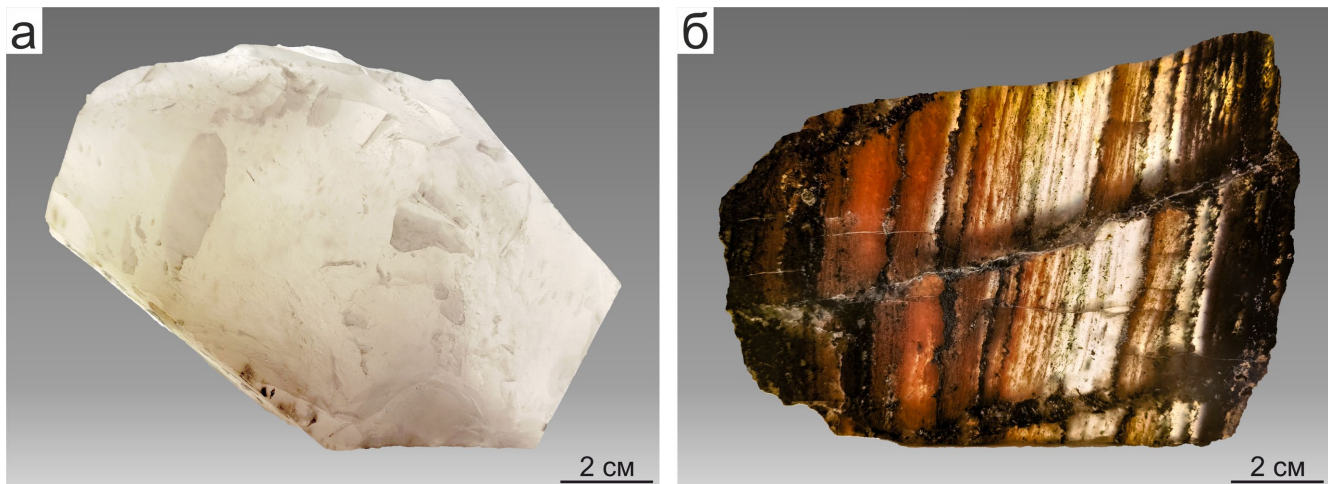


Рис. 2. Льдистый кварц (а) и гондит (льдистый кварц со скоплениями красно-коричневого граната и темного хлорита; пластина толщиной 13 мм) (б).

Фото сделано на просвет образцов.

Fig 2. Icy quartz (a) and gondite (icy quartz with layers of reddish-brown garnets and dark chlorite; plate 13 mm thick) (б).

Light source located behind samples.

Борусский офиолитовый пояс представляет собой единую моноклиналь кембрийских отложений, осложненную дополнительными складками и разломами, в тектонической зоне сопряжения которых с Джебашским выступом верхнего протерозоя и расположен Борусский массив. Общая площадь массива вместе с сателлитами составляет около 200 км², простираение северо-восточное по аз. 50–60°, контакты тектонические. В юго-западной части массива гипербазиты прорваны небольшой Кантегирской гранитоидной интрузией. На северо-востоке интрузия срезана разломами, а на ее продолжении серия мелких гипербазитовых тел прорвана Сизинской гранитоидной интрузией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы и пробы льдистого кварца и гондита с Западных Саян предоставила ООО “Томская горнодобывающая компания” (ООО “ТомГДК”), выполняющая геолого-разведочные работы на данной площади. Перечень образцов и их характеристика приведены далее.

Образец № 1 (участок Большекашкаретский). Размеры 15 × 10 × 7 см. Цвет светло-серый, дымчатый. Тонкозернистый, с прожилками мелкозернистого кварца. Излом неровный, раковистый, местами мелко раковистый. Блеск на изломе матовый, на участках мелкозернистого кварца – маслянистый. Много слепых микротрещин, отражающих свет. Светопропускание составляет около 20–25 см (см.

рис. 2а). По этим характеристикам данный микрокварцит относится к льдистому кварцу.

Образец № 2 (участок Перевальное, контур 3). Размеры 11.0 × 10.0 × 7.5 см. Цвет дымчатый с фиолетовым оттенком. Излом мелко раковистый, блеск маслянистый. Много слепых микротрещин, отражающих свет. Светопропускание, оцененное методом клина, достигает 15 мм. Этот микрокварцит, вероятно, также относится к льдистому кварцу.

Образец № 3 (участок Большекашкаретский). Размеры 14 × 9 × 7 см. Окраска грязно-белая, неравномерная. На поверхности спила наблюдается много “мякотин” (участков минеральной примеси с низкой твердостью) и каверн, слепые микротрещины. Светопропускание, замеренное методом клина, достигает 5 мм.

Образцы № 4–6 (участок контура 4). Микрокварцит в образцах № 4–6 имеет почти черный цвет, непрозрачный, излом раковистый, блеск на изломе матовый. В образце № 4 порода рассланцована.

Образец № 7 (участок Перевальное, контур 2). Гондит представлен полированной пластиной (см. рис. 2б) и несколькими необработанными кусками массой до 3 кг. Текстура гондита полосчатая, обусловленная ритмичными скоплениями оранжево-коричневого граната в полупрозрачной микрокварцитовой матрице. Излом раковистый. Блеск маслянистый.

Из всех образцов изготовлены полированные и петрографические прозрачные шлифы для изучения физико-химическими методами.

Структуры и минеральный состав микрокварцитов и гондита изучены оптическими методами в прозрачных шлифах. Химический состав микрокварцита определен рентгеноспектральным флуоресцентным методом (РФА) на СРМ-35. Химический состав отдельных минералов и включений в них изучены методами сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 при ускоряющем напряжении 20 кВ, эмиссионном токе 85 мкА, рабочем расстоянии 10 мм, времени накопления сигнала 30 с. Рентгенометрические исследования проб проведены для качественного определения минерального состава микрокварцита и гондита. Анализы выполнены в ЦПК “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптические методы. Шлифы

Обобщенное описание. Текстуры пород в представленных образцах ориентированные, полосчатые, иногда массивные. Структура гранобластовая, лепидогранобластовая, псевдоморфная. Льдистый кварц и гондит различаются только минеральным составом, %: кварц – 80–99 (максимум в льдистом кварце); гранат – до 15 (в гондите); кальцит – до 1; апатит – 1–2; хлорит – 1; титанит – ед. зн. Во всех шлифах, кроме первого, наблюдаются полосы деформации, напоминающие полисинтетическое двойникование в плагиоклазах (Родыгин, 1994). Они обычно пересекают границы многих зерен кварца и иногда сопровождаются рекристаллизацией.

Шлиф 1. Микротекстура породы равномерно зернистая, со слабо проявленной полосчатостью. Структура гранобластовая, реликтовая (при вращении столика проявляются теневые, более крупнозернистые структуры), с отдельными линзовидными, ориентированными зернами кварца на фоне однородного мелкозернистого субизометричного кварца (рис. 3а). Порода почти мономинеральная: отмечены единичные чешуйки серицита и иногда наложенная карбонатная минерализация. Для кварца, особенно в линзовидных зернах, характерно сильное волнистое угасание и блокивание. Без анализатора видна незначительная примесь мелкой непрозрачной “рудной сыпи”.

Шлиф 2. Микротекстура породы в этом образце неравномерно зернистая, со слабо проявленной полосчатостью. Структура бластомилонитовая, реликтовая (при вращении столика). Размер зерен до 1 мм. Характерно сильное волнистое угасание и блокивание. При вращении столика последовательно проявляются различная ориентировка линзовидных агрегатов кварца (см. рис. 3б). Видны тре-

щины хрупкой деформации и признаки растворения (каналов и щели на границах зерен), с образованием субизометричных зерен вторичного кварца размером до 0.05 мм. Порода имеет почти мономинеральный состав. Без анализатора видна значительная примесь “рудной пыли”, приуроченной к границам зерен и микротрещинам.

Шлиф 3. Микротекстура породы массивная, кавернозная. Структура катакластическая, участки бластомилонитовая (см. рис. 3в). Идиобласты кварца размером до 10 мм находятся в окружении субизометричных зерен вторичного кварца размером до 0.05 мм. Минеральный состав, %: кварц – 85–90, гидроксиды железа (в трещинах и псевдоморфозами лимонита по пириту) – 5–10, рудный минерал – 0–5. Без анализатора видна существенная примесь “рудной пыли”, приуроченной к границам зерен и микротрещинам, фиксируя катаклаз. “Рудная пыль”, наблюдаемая без анализатора, приурочена к границам зерен и микротрещинам и таким образом трассирует трещины катаклаза.

Шлиф 4. Углефицированный кварцитовый сланец. Микротекстура сланцеватая, полосчатая. Структура гранобластовая, с размером зерен до 0.1 мм. Минеральный состав, %: кварц – 75–80, углистое вещество – 15–20, серицит – 0–5, рудный минерал – ед. зн. Полосчатость обусловлена чередованием скоплений зерен кварца либо углеродистого материала (см. рис. 3г). В обоих случаях наблюдаются разрывы слоев и их переориентировка в кулисы под углом 10–20°, что указывает на левый сдвиг.

Шлиф 5. Микрокварцит. Микротекстура трещиноватая, прожилковая, параллельная. Микроструктура микрогранобластовая, бластомилонитовая, с размером зерен до 0.07 мм по удлинению (см. рис. 3д, е). Минеральный состав, %: кварц – 95–90, углистое вещество – 5–10, карбонаты – 0–5, гранат – зн., рудный минерал – ед. зн. Без анализатора видна существенная примесь “рудной пыли”, приуроченной к границам зерен и микротрещинам, трещинам рассланцевания. Зерна граната показывают будинаж-структуры и признаки вращения блоков против часовой стрелки. На левый сдвиг с растяжением указывают и согласные с рассланцеванием трещины, выполненные крупнозернистым кварцем. Небольшие концентрации непрозрачных минералов отмечены по стилолитовым швам (?), напоминающим птигматитовую складчатость (см. рис. 3д).

Шлиф 6. Микрокварцит. Микротекстура прожилковая, трещиноватая, реликтовая параллельная. Структура микрогранобластовая, с размером зерен до 0.05 мм (см. рис. 3ж, з). Минеральный состав, %: кварц – 95–100, карбонаты – 0–5, гранат – зн. Без анализатора видна существенная примесь “рудной пыли”, приуроченной к границам зерен и микротрещинам, фиксируя катаклаз (см. рис. 3д).

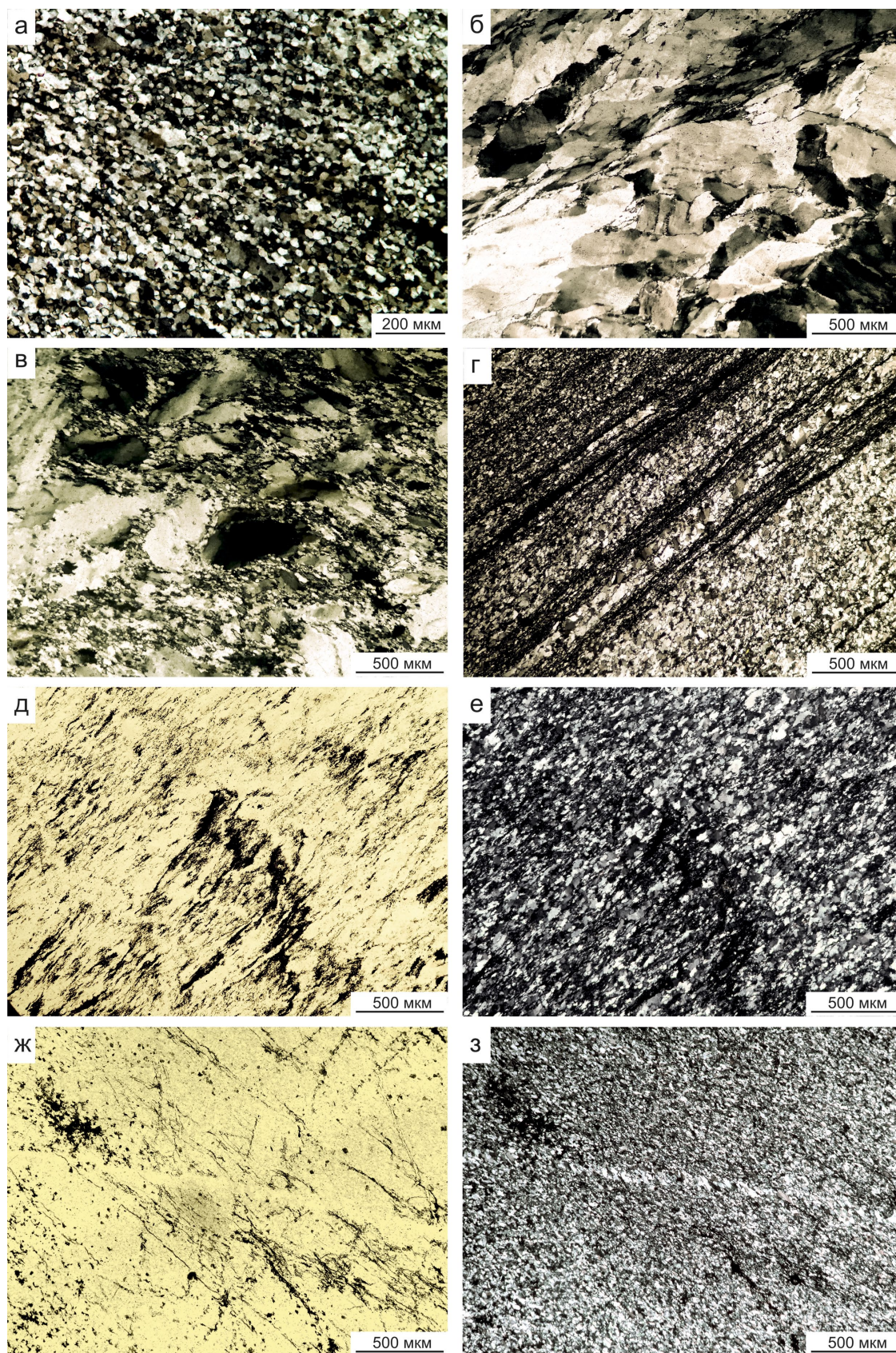


Рис. 3. Фото шлифов микрокварцита.

а – 1 (с анал.); б – 2 (с анал.); в – 3 (с анал.); г – 4 (с анал.); д, е – 5 (д – без анал., е – с анал.); ж, з – 6 (ж – без анал., з – с анал.).

Fig. 3. Thin sections of microquartzite.

а – sample 1 (XPL); б – sample 2 (XPL); в – sample 3 (XPL); г – sample 4 (XPL); д – sample 5 (PPL); е – sample 5 (XPL); ж – sample 6 (PPL); з – sample 6 (XPL).

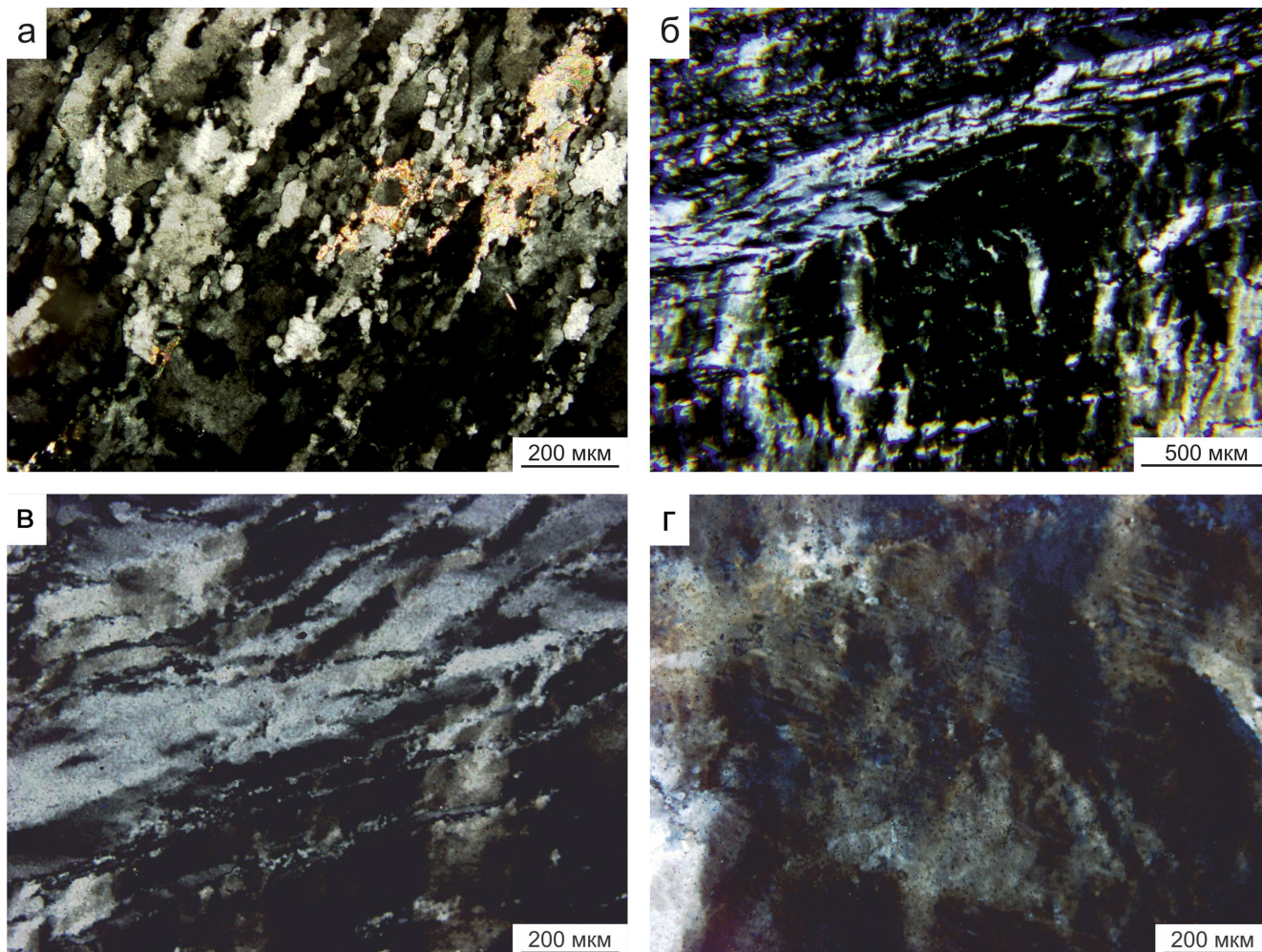


Рис. 4. Фото шлифов гондита.

а – светлая полоса (микрокварцит с наложенной карбонатной минерализацией); б, в – реликтовая текстура, пересекаемая локализованными зонами сдвига; г – полосы деформации в микрокварците, похожие на полисинтетическое двойникование в плагиоклазе.

Fig. 4. Thin sections of gondite.

а – light layer (microquartzite with carbonate mineralization); б, в – relic structures, crossed with localised fault zones; г – deformation stripes in microquartzite, similar to polysynthetic twinning in plagioclase.

Шлиф 7. Гондит. Светлые полосы в гондите по структуре и минеральному составу близки к микрокварциту обр. № 2. Текстура ориентированная, реликтовая (при вращении столика последовательно проявляются иные ориентировки линейности зерен кварца). Крупные линзовидные зерна кварца показывают существенное волнистое угасание и блокирование (рис. 4а). Границы зерен зубчатые, с новообразованным полигональным тонкозерни-

стым кварцем (см. рис. 4а, в). Также наблюдаются субпараллельные полосы деформационной перекристаллизации (см. рис. 4б, в) и полосы деформации (см. рис. 4г), внешне схожие с полисинтетическим двойникованием плагиоклаза (Родыгин, 1994; Кабанова, 2024).

В качестве минеральной примеси обычен гранат, представленный кластерами мелких изометричных зерен (рис. 5а) либо относительно круп-

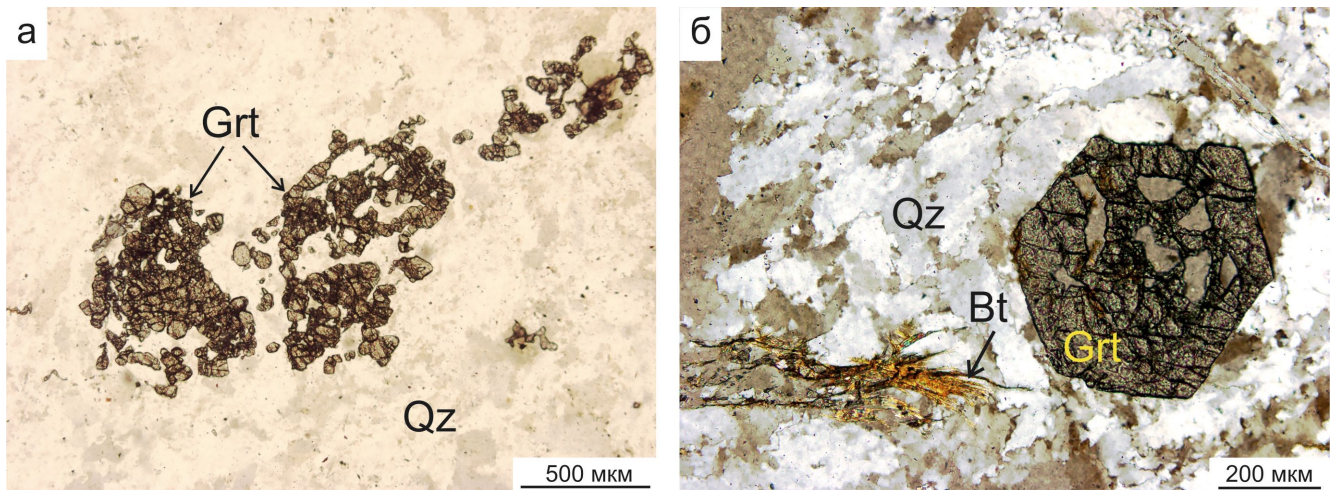


Рис. 5. Кластеры зерен граната в льдистом кварце (а) и пойкилобласт граната в микрокварците (гондите) (б).

Прозрачный шлиф. Без анализатора.

Принятые символы минералов: Ap – апатит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Carb – карбонат сложного состава, Grt – гранат, Ilm-Pph – ильменит-пирофанит, Ms – мусковит, Qz – кварц, Rt – рутил, Str – стронцианит, Str-Rds – стронцианит-родохрозит.

Fig. 5. Garnet clusters in icy quartz (a) and garnet poikiloblast in microquartzite (gondite) (б).

Thin sections, PPL.

Accepted mineral symbols: Ap – apatite, Bt – biotite, Cal – calcite, Carb – complex carbonates, Grt – garnet, Ilm-Pph – ilmenite pyrophanite, Ms – muscovite, Qz – quartz, Rt – rutile, Str – strontianite, Str-Rds – strontianite rhodochrosite.

ными пойкилобластами, с крупными включениями матрикса (см. рис. 5б). Кроме граната обычны включения мелких кристалликов бесцветного апатита, мусковита (серицита), аннита, хлорита, пирита, редко титанита. Пятнами распространена минерализация карбонатов (кальцита?) (см. рис. 4а).

Наиболее высокая концентрация граната наблюдается в красно-коричневых полосах гондита. В проходящем свете гранат окрашен в желто-коричневый цвет. Крупные кристаллы сильно трициноватые, оптически изотропны. Ориентировка зерен кварца вокруг граната обычно показывает структуру “снежного кома”, с указанием на левый сдвиг (рис. 6). На границе зерен “гранат – кварц” часто наблюдаются скопления карбоната.

Химический состав

Результаты анализов химического состава шести образцов микрокварцита приведены в табл. 1 (нумерация соответствует нумерации шлифов). Наиболее высокие содержания SiO_2 показали пробы льдистого кварца (пробы 1, 2), что согласуется с результатами изучения оптическими методами. Однако содержание аксессуарных минералов, замеченных при изучении шлифов под микроскопом, кажется значительно меньше того, что можно было ожидать по результатам химических анализов. Для контроля, после тщательной очистки, про-

ба 1 была повторно растерта и проанализирована, однако содержание SiO_2 не повысилось. Вероятно, имело место загрязнение проб материалом яшмовой ступки при растирании.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Исследование полированных шлифов 1 и 2 методом сканирующей электронной микроскопии показало, что порода мономинеральная, сложенная только кварцем, но проявились некоторые структурные особенности породы. В обоих образцах структура зерен кварца полигональная, но вариации в их размерах различаются на 1–2 порядка (рис. 7а, б). В обоих образцах наблюдаются щелевидные полости растворения кварца, что при изучении оптическими методами только предполагалось. В обр. 2 отмечаются крупные каверны, которые, судя по их границам, возникли в результате выкрашивания зерен при изготовлении шлифа (в необработанном материале каверн не обнаружено).

В микрокварците шлифа 3 отчетливо проявлены катаклиз (см. рис. 7в), кавернозность и минеральные примеси. BSE-изображение данного шлифа никак не согласуется с его изображением под оптическим микроскопом с анализатором (см. рис. 3в) и без него. Отмечены минеральные примеси, обычно приуроченные к участкам катаклаза: мусковит, ан-

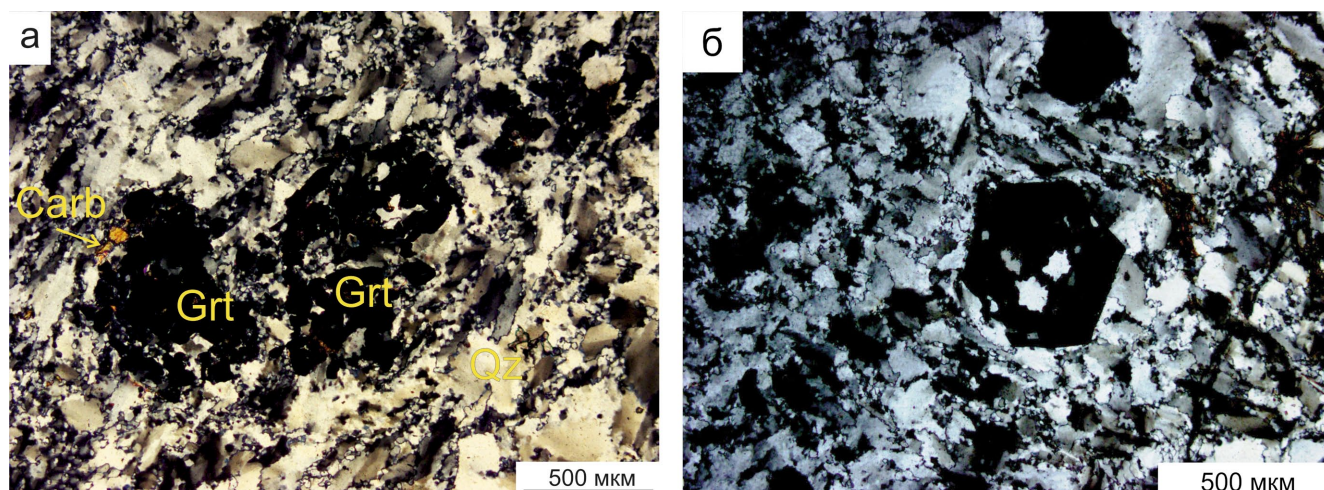


Рис. 6. Агрегат (а) и пойкилобласт (б) граната с кварцем со структурой “снежного кома”, индикатора сдвиговых зон.

В данном сечении структура показывает вращение против часовой стрелки (левый сдвиг). Прозрачный шлиф. С анализатором. Символы минералов представлены на рис. 5.

Fig. 6. Aggregate (a) and poikiloblast (б) of garnet with quartz forming “snowball” structure, fault zones indicator.

In this thin section it demonstrates signs of counter clockwise rotation. Thin sections, XPL. Symbols are same with Fig. 5.

Таблица 1. Химический состав льдистого кварца (РФА), мас. %

Table 1. Chemical composition of icy quartz (RFA), wt %

Анализ	Проба					
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	98.22	98.90	97.69	97.31	96.36	97.43
TiO ₂	0.039	0.025	0.065	0.042	0.056	0.048
Al ₂ O ₃	0.28	0.27	0.84	0.62	0.45	0.59
Fe ₂ O ₃ общ.	0.90*	0.65	0.77	1.01	1.36	1.16
MgO	0.07	0.05	0.05	0.15	0.12	0.13
CaO	0.22	0.08	0.07	0.21	0.26	0.16
MnO	<i>0.012</i>	<i>0.009</i>	<i>0.011</i>	0.056	0.059	<i>0.019</i>
Na ₂ O	0.33	0.33	0.66	0.36	0.53	0.34
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	<i>0.09</i>	<i>0.03</i>	<i>0.08</i>
P ₂ O ₅	<i>0.005</i>	<i>0.005</i>	0.010	0.067	0.021	0.008
S	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	<i>0.01</i>
Cr	0.0022	0.022	0.023	0.019	0.043	0.037
V	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
П.п.п.	0.06	0.00	0.05	0.41	0.99	0.16
Сумма	100.15	100.34	100.24	100.36	100.27	100.17

* При повторном анализе значения оказались ниже предела чувствительности метода.
 Примечание. Курсивом выделены анализы ниже чувствительности метода

* When re-analyzed, the values were below the method's sensitivity limit.
 Note. Analyses below the method's sensitivity are shown in italics.

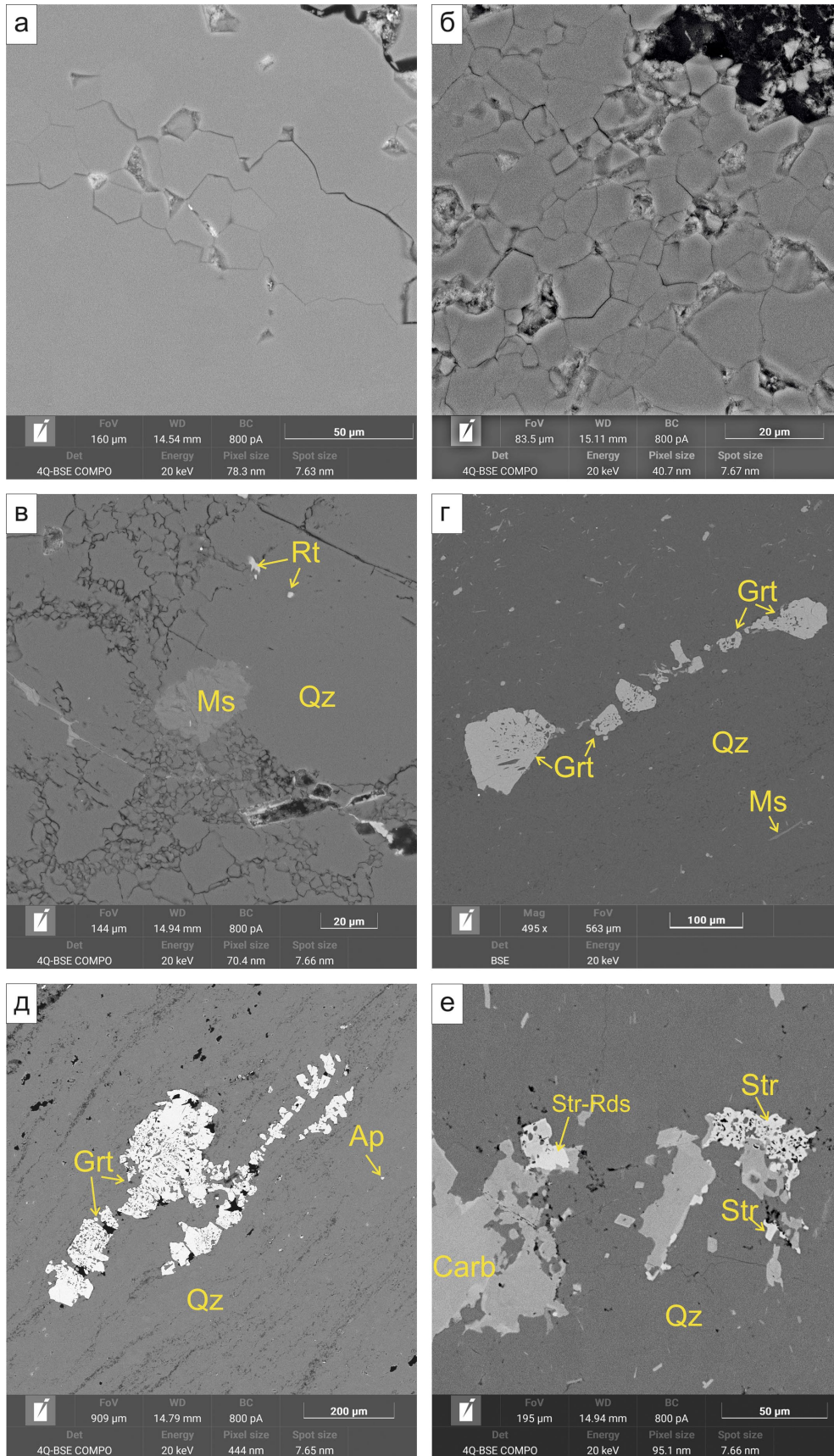


Рис. 7. BSE-изображения микрокварцита.

а – обр. 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6. Символы минералов представлены на рис. 5.

Fig. 7. BSE-images of microquartzite.

а – sample 1, б – sample 2, в – sample 3, г – sample 4, д – sample 5, е – sample 6. Symbols are same with Fig. 5.

нит, кальцит, карбонат сложного состава или тонкая смесь (Fe, Mn, Ca, Mg)-карбонатов, пирит-Co, рутил, пирротин-Ni, пентландит, халькопирит, галенит, кобальтин-Fe, Ni, магнетит, барит, циркон, фторапатит, минералы ряда ильменит-пирофанит, клинохлор, ксенотим-Y, монацит-Se, пиролюзит, гетит, уранинит. К участкам катаклаза приурочены многочисленные каверны угловатой формы.

Микрокварцит шлифа 4 показывает значительное рассланцевание, полностью контролирующее акцессорную минерализацию. Наиболее крупные минеральные образования представлены идиобластами граната (см. рис. 7г), расщепленными кристаллами (Азимов, 2005), вытянутыми согласно рассланцеванию, и, вероятно, будинированы и растащены на блоки, с признаками вращения против часовой стрелки (левый сдвиг). Состав граната (табл. 2, ан. 4–7) отвечает спессартин-альмандину и альмандин-спессартину. Другие акцессорные минералы те же, что и в шлифе 3.

Микрокварцит в шлифе 5 рассланцован меньше, чем в шлифе 4. Акцессорная минерализация так же контролируется сланцеватостью и представлена теми же минералами, включая гранат. Состав граната приведен в табл. 2, ан. 8–14. Микрокварцит шлифа 6 отличается от двух предыдущих массивной текстурой и отсутствием граната (возможно, частный случай).

Гондит представлен в шлифе 7 (рис. 8). Светлые полосы гондита принципиально не отличаются от льдистого кварца шлифов 1 и 2, а полосы, окрашенные в желто-коричневый цвет, обогащены различными минералами в виде скоплений мелких зерен и кристаллов (см. рис. 8а). В составе агрегата диагностированы гранат, F-апатит, кальцит, минерал изоморфного ряда пирофанит-ильменит. Размер зерен до 0.1–0.2 мм, редко более. Кристаллографические очертания видны только у некоторых зерен граната. Гранат и апатит сильно трещиноватые, местами брекчированные, и содержат многочисленные минеральные включения. Кальцит имеет ксеноморфные границы, цементируя зерна других минералов. Пирофанит-ильменит представлен ксеноморфными зернами в кальците и выглядит более поздним минералом.

Гранат. На рис. 8б показан футляровидный кристалл граната. Центральная часть кристалла имеет отчетливые кристаллографические очертания, трещиноватая и содержит включения кварца и кальцита. Футляровидная часть имеет вид прерывистого кольца, повторяющего очертания центральной части кристалла, отступив от нее на 10–30 мкм. Ма-

трикс сложен кварцем (микрокварцитом). В нижней левой части кристалла ширина полосы между центральной и футляровидной частью резко увеличена за счет новообразованного кальцита. Кальцит отмечен и на других участках футляровидного кристалла граната, цементирующего его фрагменты.

Состав граната центральной и футляровидной (краевой) частей кристалла несколько различаются (см. табл. 2, ан. 1–3): центр обогащен спессартиновым миалом относительно края, с примесью андрадитового и кальдеритового миалов. Край (футляровидная часть) рассчитывается на спессартин (71.85 мол. %), альмандин (9.17), андрадит (7.19) и гипотетический скиагит (10.68 мол. %). Такой тип зональности граната считают прямым.

Пирофанит-ильменит. Минералы изоморфного ряда пирофанит-ильменит встречаются и в гондите, и в микрокварците. Примечательно, что в гондите и микрокварците обр. 4 (анал. 1–4) преобладает пирофанит, а в микрокварците обр. 5 (анал. 4–7) – ильменит (табл. 3), причем различия существенные.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Высокое светопропускание льдистого кварца обусловлено тонкозернистым строением мономинеральной породы, ее массивной текстурой и гранобластовой структурой (см. рис. 3а, 7а). Очистка зерен кварца в микрокварците или исходной кварцсодержащей породы от минеральных примесей произошла в результате динамометаморфизма в условиях сдвига с транспрессией, растворением кварца под давлением, переносом и отложением в “тенях давления”. Отчетливо проявленное волнистое угасание зерен кварца, просвечивающие реликтовые структуры, блокивание, щелевидные полости растворения на границах зерен и полосы деформации в кварце свидетельствуют о пластичных деформациях (см. рис. 3б, в; 4б–г) (Кабанова, 2024; Родыгин, 1994). Возможно, что в результате рекристаллизации кварца все имевшиеся в нем примеси теперь находятся в собственных минералах, которые можно удалить в процессе обогащения. Если это так, то льдистый кварц (обр. 1) представляет интерес для получения особо чистого кварца, используемого в электронике. Благодаря своим характеристикам, особенно высокому светопропусканию (обр. 1), льдистый кварц представляет большой интерес и как сырье для изготовления высокохудожественных резных изделий.

2. Высокие абразивные свойства льдистого кварца (“арканзасского камня”) объясняются ма-

Таблица 2. Составы граната из гондита и льдистого кварца, мас. %

Table 2. Garnet compositions from gondite and icy quartz, wt %

Компонент	Г-1	Г2ц	Г2к	К4-1	К4-2	К4-3	К4-4	К5-1	К5-2	К5-3	К5-4	К5-5
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	35.43	35.94	35.5	36.66	36.87	36.39	36.27	36.29	36.50	36.86	36.72	36.89
TiO ₂	0.68	0.35	0.16	0.25	Н. о.	0.31	0.35	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.24	0.20
Al ₂ O ₃	16.54	18.15	16.48	19.95	20.03	20.27	20.35	20.46	20.05	20.08	20.10	20.14
FeO _{общ.}	9.40	2.81	14.71	12.37	20.56	13.82	11.22	14.85	14.91	14.98	12.02	13.50
MnO _{общ.}	35.75	41.28	30.59	26.26	20.68	24.79	26.89	24.54	24.36	24.03	26.86	26.78
MgO	0.27	Н. о.	0.12	0.44	0.50	0.24	0.20	0.58	0.64	0.54	0.43	0.45
CaO	1.94	1.47	2.43	4.07	1.37	4.19	4.71	3.27	3.54	3.51	3.62	2.03
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Компонентный состав, мол. %												
Спессартин {Mn ₃ }[Al ₂](Si ₃)O ₁₂	78.71	87.68	71.94	60.55	47.96	57.18	61.96	56.57	56.16	55.40	61.96	61.98
Альмандин {Fe ₃ }[Al ₂](Si ₃)O ₁₂			6.32	25.80	46.93	29.36	22.89	30.31	30.26	32.50	25.74	30.85
Анрадит {Ca ₃ }[Fe ₂](Si ₃)O ₁₂	3.64	3.35	6.73	3.09	0.22	2.54	2.43	2.17	3.86	2.40	1.72	
Гроссуляр {Ca ₃ }[Al ₂](Si ₃)O ₁₂				7.56	2.06	8.74	10.22	7.37	6.46	7.84	7.36	3.80
Пироп {Mg ₃ }[Al ₂](Si ₃)O ₁₂			0.50	1.79		0.97	0.81	2.35	2.60	0.88	1.72	0.66
Мажорит {Mg ₃ }[MgSi](Si ₃)O ₁₂					1.10					0.98	0.02	0.57
Моримотоит {Ca ₃ }[TiFe ²⁺](Si ₃)O ₁₂				0.91							1.48	
Кальдерит {Mn ₃ }[Fe ₂](Si ₃)O ₁₂	5.35	6.39										
<i>Шорломит-А1</i> {Ca ₃ }[Ti ₂](SiAl ₂)O ₁₂	2.13	1.00	0.50	0.31		0.95	1.07					
<i>Скиагит</i> {Fe ₃ }[Fe ₂](Si ₃)O ₁₂	8.83		12.92									
<i>Блитит</i> {Mn ₃ }[Mn ₂](Si ₃)O ₁₂		1.39										
Остаток	1.34	0.18	1.09	0	1.73	0.26	0.61	1.23	0.66	0	0	2.14
$\{Mn_{2.52}Fe^{2+}_{0.27}Ca_{0.17}Mg_{0.03}\}_{2.99}[Al_{1.57}Fe^{3+}_{0.39}Ti_{0.04}]_{2.01}(Si_{2.95}Al_{0.05})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{2.87}Ca_{0.13}\}_{3.00}[Al_{1.75}Fe^{3+}_{0.19}Ti_{0.02}Mn^{3+}_{0.03}]_{2.00}(Si_{2.98}Al_{0.02})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{2.16}Fe^{2+}_{0.58}Ca_{0.22}Mg_{0.01}\}_{2.97}[Al_{1.58}Fe^{3+}_{0.45}Ti_{0.01}]_{2.03}(Si_{2.96}Al_{0.04})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.82}Fe^{2+}_{0.77}Ca_{0.36}Mg_{0.05}\}_{3.00}[Al_{1.91}Fe^{3+}_{0.07}Ti_{0.02}]_{2.00}(Si_{2.99}Al_{0.01})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.44}Fe^{2+}_{1.41}Ca_{0.12}Mg_{0.03}\}_{3.00}[Al_{1.94}Mg_{0.03}Si_{0.03}]_{2.00}(Si_{3.00})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.72}Fe^{2+}_{0.88}Ca_{0.37}Mg_{0.03}\}_{2.99}[Al_{1.93}Fe^{3+}_{0.06}Ti_{0.02}]_{2.01}(Si_{2.97}Al_{0.03})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.86}Fe^{2+}_{0.69}Ca_{0.41}Mg_{0.02}\}_{2.99}[Al_{1.92}Fe^{3+}_{0.08}Ti_{0.02}]_{2.02}(Si_{2.96}Al_{0.04})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.70}Fe^{2+}_{0.91}Ca_{0.29}Mg_{0.07}\}_{2.96}[Al_{1.93}Fe^{3+}_{0.10}]_{2.04}(Si_{2.96}Al_{0.04})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.68}Fe^{2+}_{0.91}Ca_{0.31}Mg_{0.08}\}_{2.98}[Al_{1.91}Fe^{3+}_{0.11}]_{2.02}(Si_{2.98}Al_{0.02})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.66}Fe^{2+}_{0.98}Ca_{0.31}Mg_{0.06}\}_{3.00}[Al_{1.93}Fe^{3+}_{0.05}Mg_{0.01}Si_{0.01}]_{2.00}(Si_{3.00})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.86}Fe^{2+}_{0.77}Ca_{0.32}Mg_{0.05}\}_{3.00}[Al_{1.94}Fe^{3+}_{0.05}Ti_{0.01}]_{2.00}(Si_{3.00})_{3.00}O_{12}$ $\{Mn_{1.86}Fe^{2+}_{0.93}Ca_{0.18}Mg_{0.04}\}_{3.00}[Al_{1.95}Mg_{0.02}Si_{0.02}Ti_{0.01}]_{2.00}(Si_{3.00})_{3.00}O_{12}$												

Примечание. 1–3 – футляровидный (атолловый) гранат из гондитов (ц – центр зерна, к – край зерна); 4–7 – шлиф 4; 8–12 – шлиф 5. Н. о. – не обнаружено. Шорломит-А1, скиагит, блитит выделены курсивом, так как являются гипотетическими. Присутствие Si в октаэдрической позиции считается маловероятным, но для сохранения баланса заряда часть элемента включена в формулу. Формулы и молярные пропорции конечных элементов граната рассчитаны с помощью электронной таблицы Microsoft Excel (Locock, 2008).

Note. 1–3 – case-shaped (atoll) garnet from gondites (ц – grain center, к – grain edge); 4–7 – thin section 4; 8–12 – thin section 5. Н. о. – not found. Shorlomite-Al, skiagite, and blitite are shown in italics because they are hypothetical. The presence of Si in the octahedral position is considered unlikely, but to maintain charge balance, part of the element is included in the formula. The formulas and molar proportions of the end elements of the garnet were calculated using a Microsoft Excel spreadsheet (Locock, 2008).

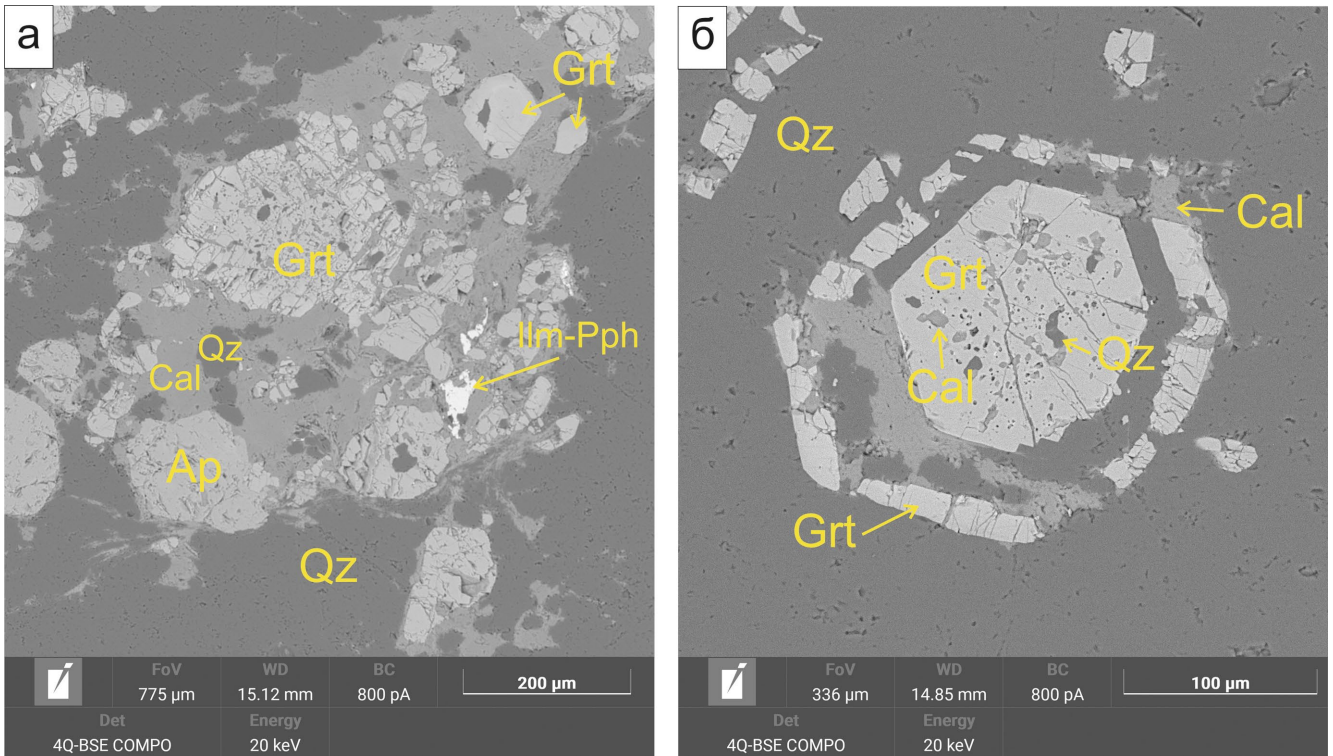


Рис. 8. BSE-изображения шлифа 7 (гондит).

а – минеральное скопление в желто-коричневой полосе гондита, б – футляровидный (атолловидный) кристалл граната. Символы минералов представлены на рис. 5.

Fig. 8. BSE-images of thin section 7 (gondite).

a – mineral cluster in yellowish brown layer of gondite, б – case-like crystal of garnet. Symbols are same with Fig. 5.

лыми размерами полигональных зерен кварца, массивной текстурой, наличием “щелей растворения” на границах зерен. Тонкие щелевидные полости на границах полигональных зерен кварца образца № 1 хорошо видны на BSE-изображении рис. 7а, б.

3. Микрокварциты типа льдистый кварц и гондит образовались в условиях динамометаморфизма, обусловленного деформациями сдвига с транспрессией. По информации Н.Л. Добрецова (1963), включения в кварце в данном типе микрокварцита очень мелкие и представлены “сухими” газами. Полосчатость в гондитах объясняется, вероятно, рекристаллизацией кварца в условиях сдвига с транспрессией, его очисткой от минеральных примесей с локализацией их в сдвиговых зонах. На это указывают структуры “снежного кома” гранат-кварцевых агрегатов и мелкие складки волочения, наблюдаемые в образцах гондитов, отвечающие левому сдвигу. При вращении предметного столика микроскопа в шлифах 2, 3, 5 последовательно проявляются реликтовые линзовидно-полосчатые структуры с волнистым угасанием и блокированием кварца; отдельные субмикронные зерна и агрегаты зерен минералов показывают признаки вра-

щения против часовой стрелки, что можно трактовать как левый транспрессионный сдвиг.

4. Лиловая окраска микрокварцита обр. 2 обусловлена, вероятно, наличием “рудной пыли” – неравномерно распределенные очень мелкие рудные минералы, которые хорошо видны под микроскопом в проходящем свете без анализатора и иногда обнаруживаются при исследовании методами СЭМ. В обр. 2 зерна кварца сильно дифференцированы по размеру и степени их полигонизации по сравнению с обр. 1.

5. Проблемы геологии и происхождения гондитов обсуждались многими исследователями (Головко, Иконникова, 1977; Конева и др., 1991, 1998; Школьник и др., 2019). Сообщается, что термин “гондит” впервые был использован для кварц-спессартиновых метаморфических пород осадочного происхождения, которые позднее были обнаружены во многих регионах мира. Минеральный состав их непостоянен, что вызвало дискуссии по составу гондитов и определению границ применения термина. В настоящее время под гондитами понимают метаморфизованные первично обогащенные MnO алюмосиликатные осадочные по-

Таблица 3. Химический состав минералов ряда ильменит-пирофанит, мас. %**Table 3.** Chemical composition of minerals of the ilmenite-pyrophanite series, wt %

Компонент	Г-1	К-4-1	К-4-2	К-5-1	К-5-2	К-5-3	К-5-4
	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	1.49	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
TiO ₂	52	51.32	47.55	52.84	52.67	52.63	53.17
FeO	19.5	19.26	25.64	35.51	38.66	36.33	37.22
MnO	27.01	29.42	26.81	11.65	8.66	11.04	9.61
Сумма	100	100	100	100	99.99	100	100
Компонентный состав, мол. %							
Ильменит FeTiO ₃	41.6	39.3	48.6	75.1	81.5	76.5	79.3
Пирофанит MnTiO ₃	58.4	60.7	51.4	24.9	18.5	23.5	20.7
$(\text{Mn}_{0.57}\text{Fe}_{0.41})_{0.98}(\text{Ti}_{0.97}\text{Si}_{0.04})_{1.01}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.63}\text{Fe}_{0.41})_{1.01}\text{Ti}_{0.98}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.59}\text{Fe}_{0.56})_{1.15}\text{Ti}_{0.93}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.25}\text{Fe}_{0.75})_{1.00}\text{Ti}_{1.00}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.19}\text{Fe}_{0.82})_{1.01}\text{Ti}_{1.00}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.24}\text{Fe}_{0.77})_{1.01}\text{Ti}_{1.00}\text{O}_3$ $(\text{Mn}_{0.20}\text{Fe}_{0.78})_{0.98}\text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$							

Примечание. Пересчет состава для минералов ильменит-пирофанитового ряда выполнен с расчетной основой на три атома кислорода. Номера проб те же, что и в табл. 2.

Note. The compositional recalculation for ilmenite-pyrophanite series minerals was performed using a calculation basis of three oxygen atoms. Sample numbers are the same as in Table 2.

роды (Школьник и др., 2019). Кроме кварца и спессартина в гондитах отмечены пироксмангит, родонит, марганцевые клино- и ортопироксены, Mn-амфиболы и слюды, эпидот, Mn-ильменит и пирофанит, а также браунит, голландит, яacobсит, гаусманит. Образуются гондиты в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фаций метаморфизма.

У нас нет данных о субстрате гондитов Борусского хребта. По причине мелких размеров индивидов граната в гондите и микрокварците исследованных образцов, часто их агрегатного состояния (см. рис. 5а) выявление зональности в гранатах технически затруднено. Предполагаем, что такая зональность отражена в футляро- или атоллоидных кристаллах (см. рис. 8б; табл. 2, ан. 2, 3) (Бадрединов, Тарарин, 2018). В них центр представлен спессартином с примесью андрадитового, кальдеритового и гипотетических шорломит-А1 и блититового миалов, а внешняя, атоллоидная, часть кристалла – спессартином, алмандином, пиропом с гипотетическими шорломитовым-А1 и скиагитовым миалами. Такой тип зональности в гранатах принято считать нормальным, или прямым. Разбор причин возникновения прямой зональности граната приводит О.В. Авченко (1982). Называются две возможные причины: 1) прогрессивный метаморфизм (изохимический процесс); 2) обеднение среды мине-

ралообразования MnO во времени, которое может проходить в изотермических условиях. Признаком первого варианта указано несопряженное изменение MnO и MgO в гранате; сопряженное изменение MnO и MgO в гранате, наоборот, может указывать на второй вариант. В нашем случае подходит первый вариант – прогрессивный метаморфизм.

Гранаты из гондита и микрокварцита несколько различаются по составу (см. табл. 2): первые (особенно ядро) обогащены спессартиновым миалом и попадают в поля гранат-кварц-ильменитовых (чистых) гондитов (дистальные залежи) и гранат-кварц-амфибол-родонитовых (мультиминеральных гондитов) (рис. 9); вторые – обогащены алмандиновым, гроссуляровым, андрадитовым и пироповым миалами (см. табл. 2, ан. 4–12), на тройной диаграмме попадают в поля II (гранат-кварц-ильменитовые гондиты) и III – гранат-кварц-амфибол-гиалофан-родонитовые (мультиминеральные гондиты). Вероятная причина такой разности – первичное содержание MnO, TiO₂ и FeO в осадочных породах.

6. Лыдый кварц в Борусском офиолитовом поясе ассоциирует с жадеитом и нефритом, как и в Итмурундинском меланже (комплексе метаморфических пород высоких давлений, сложенном жадеитизированными альбит-актинолитовыми кри-

сталлическими сланцами с прослоями льдистого кварца, включениями жадеититов и омфацититов, гранатовых амфиболитов и гранат-глаукофановых сланцев (Ермолов, 2013)). Ранее такое сходство отметил Н.Л. Добрецов (1963), который описал льдистый и сахаровидный кварц, напоминающий кварц, описанный В.Н. Москалевой (1960), в связи с жадеититами Прибалхашья. Полигональная трещиноватость (грануляция) кварца, по мнению Н.Л. Добрецова, не может быть обусловлена тектоническими дифференциальными подвижками. Это явление в кварце хорошо изучено и объясняется рекристаллизацией, перекристаллизацией при деформациях (Родыгин, 1994; Кабанова, 2024; и др.), что полностью согласуется с нашими наблюдениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Высокое светопропускание льдистого кварца обр. 1 обусловлено тонкозернистым строением мономинеральной породы, ее массивной текстурой и гранобластовой структурой. Очистка зерен кварца в микрокварците или исходной кварцсодержащей породы от минеральных примесей произошла в результате динамометаморфизма в условиях сдвига с транспрессией, растворением кварца под давлением, переносом и отложением в “тенях давления”. Крупные зерна кварца испытали пластичные деформации и блокирование, растворение под давлением, рекристаллизацию и грануляцию. Возможно, что в результате рекристаллизации кварца все примеси субстрата находятся в микрокварците в собственных минералах, которые можно удалить в процессе обогащения. В связи с этим льдистый кварц, представленный в обр. 1, следует проверить на возможность обогащения физико-химическими методами до кондиций “особо чистого кварца”, востребованного в электронной промышленности.

2. Льдистый кварц обр. 1 обладает высокими художественно-декоративными качествами (мономинеральный, массивный, мелкозернистый, с высоким светопропусканием, хорошо принимающий полировку), что позволяет использовать его для изготовления высокохудожественных ювелирных изделий и сувениров; камни менее высокого качества могут применяться для изготовления декоративно-облицовочных плит. Микрокварцит обр. 2, 5 и 6 также пригоден для создания камнерезных изделий. Черный микрокварцит обр. 5 и 6 окрашен углеродистым веществом и по характеристикам близок к черному халцедону, используемому в США для ювелирных изделий под геммологическим названием “черный оникс”. Гондиты Борусского офиолитового пояса по художественно-декоративным качествам и механическим свойствам также подходят для глиптики, тел вращения и изготовления сувенирной продукции. Микрокварциты всех типов и гондит могут применяться в каче-

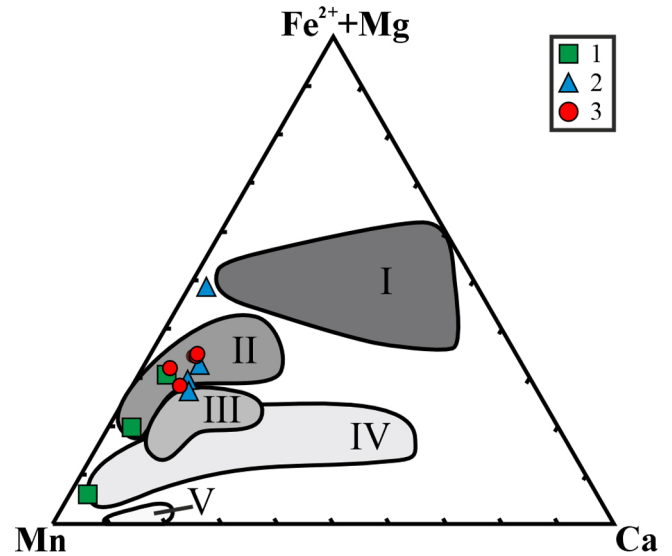


Рис. 9. Треугольная диаграмма состава гранатов из гондита и микрокварцита.

1 – из гондита; 2 – из микрокварцита, шлиф 4; 3 – то же, шлиф 5. Показаны поля минеральных ассоциаций из гондитов Северной Ганы (Melcher, 1995): I – гранат-содержащие хлоритовые сланцы; II – гранат-кварц-ильменитовые (чистые) гондиты (дистальные залежи); III – гранат-кварц-амфибол-гиалофан-родонитовые (мультиминеральные гондиты); IV – гранат-кварц-амфибол-родонитовые (мультиминеральные гондиты); V – гранат-амфибол-родонитовые (проксимальные залежи).

Fig. 9. Triangular diagram of the composition of garnets from gondite and microquartzite.

1 – from gondite; 2 – from microquartzite, thin section 4; 3 – the same, thin section 5. The fields of mineral associations from gondites of Northern Ghana are shown (Melcher, 1995): I – garnet-bearing chlorite schists; II – garnet-quartz-ilmenite (pure) gondites (distal deposits); III – garnet-quartz-amphibole-hyalophane-rhodonite (multimineral gondites); IV – garnet-quartz-amphibole-rhodonite (multimineral gondites); V – garnet-amphibole-rhodonite (proximal deposits).

стве декоративно-облицовочного камня при необходимости блочности и отсутствии рассланцевания.

3. По размеру зерна, минеральному составу микрокварцита обр. 1, 2, 5 и 6 отвечают характеристикам микрокварцита типа “арканзасский камень”, используемого для заточки и доводки ножей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авченко О.В. (1982) Петрогенетическая информативность гранатов метаморфических пород. М.: Наука, 95 с.
 Азимов П.Я. (2005) Механизмы кристаллизации метаморфических гранатов. *Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии. Мат-лы Междунар. (X Всерос.) петрограф. сов-я.* Апатиты: Кол. ИЦ РАН, 7-9.
 Бадрединов З.Г., Тарарин И.А. (2018) Автоэпитаксия гра-

- ната кристаллических сланцев метаморфического комплекса Центральной Камчатки (к проблеме образования атоллавых гранатов). *Вестн. ДВО РАН*, (3), 162-167.
- Головко В.А., Иконникова З.И. (1977) Гондиты Восточного Саяна. М.: ВИНТИ, 17 с.
- Добрецов Н.Л. (1963) Минералогия, петрография и генезис гипербазитов, жадеититов и альбититов хр. Борус (Западный Саян). *Тр. ИГГ СО АН СССР, вып. 15. Материалы по генетической и экспериментальной минералогии*. Новосибирск, СО АН СССР, 242-316.
- Добрецов Н.Л., Татаринов А.В. (1983) Жадеит и нефрит в офиолитах (на примере Западного Саяна). Новосибирск: Наука, 126 с.
- Ермолов П.В. (2013) Актуальные проблемы изотопной геологии и металлогении Казахстана. Караганда: Издательско-полиграфический центр Казахстанско-Российского университета, 206 с.
- Инструкция по попутным поискам месторождений камнесамоцветного сырья (ювелирного, ювелирно-поделочного и поделочного) (1979). М.: Мингео СССР; Союзкварцсамоцветы, 41 с.
- Кабанова Л.Я. (2024) Свидетельства деформационного преобразования минералов кварцевой жилы Беркутинская (Южный Урал) под действием динамометаморфических процессов. *Минералогия*, **10**(2), 26-45. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2024-10-2-2>
- Киевленко Е.Я. (2001) Геология самоцветов. М.: Земля; Экост, 584 с.
- Конева А.А., Макрыгина В.А., Пискунова Л.Ф., Ущачовская З.Ф. (1991) О гондитовой формации в Приольхонье (Западное Прибайкалье). *Докл. АН СССР*, **319**(1), 213-218.
- Конева А.А., Макрыгина В.А., Резницкий Л.З. (1998) Гондиты в метаморфических толщах Прибайкалья. *Литология и полез. ископаемые*, (1), 93-102.
- Москалева В.Н. (1960) К проблеме жадеита. *Геология рудн. месторождений*, (1), 107-113.
- Родыгин А.И. (1994) Микроструктурный анализ кварца (с методическими указаниями и примерами геологической интерпретации). Томск: Изд-во Томск. ун-та, 217 с.
- Шаталина Т.А., Сосновская О.В., Александровский Ю.С. (2019) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Западно-Саянская. Л. N-46-XXVI (Саяногорск). Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 224 с.
- Школьник С.И., Бараш И.Г., Буянтуев М.Д. (2019) Изотопно-геохимический состав, минералогия и генезис марганценосных пород гондитовой формации Икатского террейна (Восточное Прибайкалье). *Геология и геофизика*, **60**(2), 159-178.
- Locock, A.J. (2008) An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computers & Geosciences*, **34**(12), 1769-1780. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.12.013>
- Melcher F. (1995) Genesis of chemical sediments in Birimian greenstone belts: evidence from gondites and related manganese-bearing rocks from northern Ghana. *Miner. Mag.*, **59**, 229-251.
- Moskaleva V.N. (1960) On the problem of jadeite. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (1), 107-113. (In Russ.)
- Rodygin A.I. (1994) Microstructural analysis of quartz (with guidelines and examples of geological interpretation). Tomsk, Izd-vo Tomsk. un-ta, 217 p. (In Russ.)
- Shatalina T.A., Sosnovskaya O.V., Aleksandrovskiy Yu.S. (2019) State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000. 2nd ed. West Sayan Series. Sheet N-46-XXVI (Sayanogorsk). Explanatory Note. Saint Petersburg, VSEGEI, 224 p. (In Russ.)
- Shkol'nik S.I., Barash I.G., Buyantuyev M.D. (2019) Isotope-geochemical composition, mineralogy and genesis of manganese-bearing rocks of the gondite formation of the Ikat terrane (Eastern Baikal region). *Geologiya i geofizika*, **60**(2), 159-178. (In Russ.)
- Yermolov P.V. (2013) Current issues of isotope geology and metallogeny in Kazakhstan. Karaganda, Izdatel'sko-poligraficheskiy tsentr Kazakhstansko-Rossiyskogo universiteta, 206 p. (In Russ.)
- Azimov P.Ya. (2005) Crystallization mechanisms of metamorphic garnets. *Metamorphism, cosmic, experimental and general problems of petrology. Proc. of the Int. (X All-Russian) petrographic conf. Apatity, Izd-vo Kol'skogo NTs RAN*, 7-9. (In Russ.)
- Badredinov Z.G., Tararin I.A. (2018) Autoepitaxy of garnet from crystalline schists of the Central Kamchatka metamorphic complex (to the problem of formation of atoll garnets). *Vestn. DVO RAN*, (3), 162-167. (In Russ.)
- Dobretsov N.L. (1963) Mineralogy, petrography and genesis of ultramafics, jadeites and albitites of the Borus ridge (Western Sayan). *Tr. IGG SO AN SSSR, vyp. 15. Materials on genetic and experimental mineralogy*. Novosibirsk, SO AN SSSR, 242-316. (In Russ.)
- Dobretsov N.L., Tatarinov A.V. (1983) Jadeite and nephrite in ophiolites (using the Western Sayan as an example). Novosibirsk, Nauka Publ., 126 p. (In Russ.)
- Golovko V.A., Ikonnikova Z.I. (1977) Gondites of the Eastern Sayan. Moscow, VINITI, 17 p. (In Russ.)
- Instructions for prospecting for gemstone deposits (jewelry, jewelry-and-ornamental, and ornamental) (1979). Moscow, Mingeo SSSR; Soyuzkvarcсамotsvety, 41 p. (In Russ.)
- Kabanova L.Ya. (2024) Evidences of deformations of minerals of the berkut quartz vein (south urals) affected by dynamometamorphic processes. *Mineralogiya*, **10**(2), 26-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2024-10-2-2>
- Kiyevlenko Ye.Ya. (2001) Geology of gems. Moscow, Zemlya; Ekost, 584 p. (In Russ.)
- Koneva A.A., Makrygina V.A., Piskunova L.F., Ushchapovskaya Z.F. (1991) About the gondite formation in Priolkhonye (Western Baikal region). *Dokl. AN SSSR*, **319**(1), 213-218. (In Russ.)
- Koneva A.A., Makrygina V.A., Reznitskiy L.Z. (1998) Gondites in metamorphic strata of the Baikal region. *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (1), 93-102. (In Russ.)
- Locock, A.J. (2008) An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computers & Geosciences*, **34**(12), 1769-1780. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.12.013>
- Melcher F. (1995) Genesis of chemical sediments in Birimian greenstone belts: evidence from gondites and related manganese-bearing rocks from northern Ghana. *Miner. Mag.*, **59**, 229-251.
- Moskaleva V.N. (1960) On the problem of jadeite. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (1), 107-113. (In Russ.)
- Rodygin A.I. (1994) Microstructural analysis of quartz (with guidelines and examples of geological interpretation). Tomsk, Izd-vo Tomsk. un-ta, 217 p. (In Russ.)
- Shatalina T.A., Sosnovskaya O.V., Aleksandrovskiy Yu.S. (2019) State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000. 2nd ed. West Sayan Series. Sheet N-46-XXVI (Sayanogorsk). Explanatory Note. Saint Petersburg, VSEGEI, 224 p. (In Russ.)
- Shkol'nik S.I., Barash I.G., Buyantuyev M.D. (2019) Isotope-geochemical composition, mineralogy and genesis of manganese-bearing rocks of the gondite formation of the Ikat terrane (Eastern Baikal region). *Geologiya i geofizika*, **60**(2), 159-178. (In Russ.)
- Yermolov P.V. (2013) Current issues of isotope geology and metallogeny in Kazakhstan. Karaganda, Izdatel'sko-poligraficheskiy tsentr Kazakhstansko-Rossiyskogo universiteta, 206 p. (In Russ.)

REFERENCES

Avchenko O.V. (1982) Petrogenetic information content of garnets from metamorphic rocks. Moscow, Nauka Publ.,