

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КВАРЦИТОВ БУРАЛ-САРДЫКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Д.Ц. Аюржанаева^{1,4}, А.М. Федоров², А.М. Мазукабзов³, А.И. Непомнящих²,
Э.А. Очирова¹, В.Ф. Посохов¹

¹ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

⁴ Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия

Рассмотрены механизмы формирования высокочистых кварцитов Бурал-Сардыкского месторождения. На основе стадийного анализа осадочно-метаморфической толщи установлена последовательность постседиментационных преобразований высококремнеземных пород. Комплексные исследования с использованием геологических, геохимических методов и данных изотопных исследований позволили показать роль тектоники, магматизма и метаморфизма — регионального и контактового, а также динамометаморфизма при формировании высокочистых кварцитов. Выявлены и описаны две основные разновидности тектонитов: стресс-метаморфические тектониты и катаклазиты. Представлена новая геологическая карта Бурал-Сардыкского месторождения м-ба 1:10 000.

Высокочистые кварциты, геологическое строение, петрография кварцитов, геохимические особенности, механизм формирования.

MECHANISMS OF HIGH-PURITY QUARTZITE FORMATION AT THE BURAL-SARDYK DEPOSIT (Russia)

D.Ts. Ayurzhanava, A.M. Fedorov, A.M. Mazukabzov, A.I. Nepomnyashchikh,
E.A. Ochirova, and V.F. Posokhov

The paper discusses the mechanisms of formation of high-purity quartzites from the Bural-Sardyk deposit. Based on a stadiational analysis of the sedimentary-metamorphic sequence, we interpret the succession of postsedimentary transformations of high-silica rocks. Comprehensive studies using geological and geochemical methods and isotope research data reveal the role of tectonics, magmatism, metamorphism (regional and contact), and dynamic metamorphism in the formation of high-purity quartzites. Two main varieties of tectonites have been identified and described: stress-metamorphic tectonites and cataclasites. The paper presents a new geological map of the Bural-Sardyk deposit on a 1:10,000 scale.

High-purity quartzites, geologic structure, petrography of quartzites, geochemical features, formation mechanism

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребление химически чистого природного кремнеземного сырья, позволяющего получать в процессе обогащения высококачественные концентраты, отвечающие современным требованиям отечественной и мировой промышленности. Одним из таких объектов является Бурал-Сардыкское месторождение кварцитов с нетрадиционным источником кварцевого сырья. Здесь новый промышленный тип «руд» представлен мономинеральными белыми, светло-серыми химически чистыми кварцитами — «суперкварцитами», в которых содержание суммы элементов-примесей во многих пробах не превышает 12—50 г/т (10—4 %), что соответствует по ТУ-5726-002-11496665-97 кварцевым концентратам высокой чистоты, для оптического стекловарения и изготовления кварцевой керамики [Воробьев и др., 2003; Непомнящих и др., 2017]. Изучение серых, темно-серых разновидностей микрокварцитов показало, что они пригодны для получения кремния солнечного качества [Федоров и др., 2012]. Генетические отличия кварцевых месторождений влияют на промышленные характеристики получаемого сырья.

Существует несколько противоположных гипотез формирования бурал-сардыкских кварцитов. Большинство авторов считают, что протолитом кварцитов были терригенно-карбонатно-кремнистые отложения морского бассейна, существовавшего в среднем рифее [Воробьев и др., 2003; Быдтаева и др., 2006; Семейкин, 2006; Федоров и др., 2011; Макрыгина, Федоров, 2013; Анфилогов и др., 2015]. Основ-

© Д.Ц. Аюржанаева✉, А.М. Федоров, А.М. Мазукабзов, А.И. Непомнящих, Э.А. Очирова, В.Ф. Посохов, 2020

✉ e-mail: dulmazhap@mail.ru

DOI: 10.15372/GiG2020106

ное расхождение мнений авторов касается доли участия терригенной и кремнистой составляющей, по которым формировались высокочистые разности кварцитов. Также несколько отличаются точки зрения исследователей на механизм формирования тел высокочистых кварцитов. Е.И. Воробьев с соавторами [2003] полагает, что кварциты образовались в результате метасоматических изменений кремневидных микрокварцитов — литифицированных осадков типа хемогенных кремнеземистых гелей под влиянием гранитной интрузии. В.Н. Анфилогов с соавторами [2015] считают, что кварциты образовались в результате гидротермальной проработки аркозовых песчаников и графитовых сланцев. Они предположили, что осветленные разности образовались в результате рекристаллизации первичного обломочного кварцевого зерна на фрагменты. Сформированные высококремнеземные породы были названы ранее вторичными кварцитами [Кабанова и др., 2014]. Н.Г. Быдтаева с соавторами [2006] связывают образование высокочистых кварцитов с региональными тектоническими событиями. Так, в структурах сжатия, образованных в результате взаимодействия двух ортогонально направленных региональных сдвиговых систем, происходит преобразование исходных кремнистых пород в гранулированный кварц. При этом очистка исходных пород от минералов-примесей происходила под воздействием углекислотно-водного флюида, генерируемого при тектонометасоматических преобразованиях известняков. В работах А.М. Федорова и др. [2011, 2012] выдвинута гипотеза, что суперкварциты и осветленные разновидности кварцитов сформировались в результате перекристаллизации исходных серых и темно-серых углеродсодержащих хемогенных силицитов под влиянием однонаправленного дискретного динамического стресса. Напряжения были вызваны оползанием вышележащих пород офиолитового комплекса по чехлу Гарганской глыбы после внедрения надсубдукционных гранитоидов сумсунурского комплекса.

Еще одним нерешенным вопросом оставалась проблема взаимоотношения гранитогнейсов фундамента с отложениями иркутской свиты в пределах месторождения. Как сообщает И.Н. Семейкин [2009], большинство исследователей, начиная с В.Н. Лодочникова [1941], отмечали нормальное залегание иркутской свиты на породах Гарганской глыбы, другие считают, что контакт между ними тектонический. Он проследил более 35 пересечений контакта иркутской свиты с подстилающими породами и пришел к выводу, что гранитогнейсы фундамента перекрываются сублиторальными осадками преиркутской свиты (полимиктовые конгломераты, аркозовые песчаники, кварц-эпидот-биотитовые сланцы, темно-серые известняки). Последние перекрыты кварцевыми обломочными породами иркутской свиты (мономинеральными кварцевыми метапесчаниками, алевролитами, сланцами), образующими ритмичный трех- и четырехкомпонентный базальный горизонт, представленный трансгрессивной серией. Эти размытые продукты коры выветривания испытывали продолжительный перенос и относительно хорошую сортировку морской средой и отлагались в сравнительно удаленной от берега части сублиторальной зоны бассейна [Семейкин, 2009].

По результатам полевых исследований за период с 2014 по 2019 г. получены новые данные по геологическому строению Бурал-Сардыкского месторождения, был изучен вещественный состав и изотопно-геохимические особенности высококремнеземных пород продуктивного горизонта, а также вмещающих пород. На основе полученных данных установлен источник кварца высококремнеземных пород продуктивного горизонта и последовательность их преобразования, проведены структурные исследования, что позволило нам предложить новый механизм формирования высокочистых кварцитов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение содержаний петрогенных и редких элементов в породах выполнено силикатным и ICP-AES методами в ЦКП ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов, флюидные включения в кварце кварцитов изучались на поляризационном микроскопе Olympus BX53 и на электронном микроскопе LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy-350 в ЦКП ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ, аналитик Е.А. Хромова).

Изотопные составы кислорода в кварце кварцитов, аркозовых песчаников, гранитоидов и в карбонатах определены в ЦКП ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ, аналитик В.Ф. Посохов). Измерения изотопного состава кислорода выполнялись в виде O_2 на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 ГИН СО РАН с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт–образец). Подготовка образцов для определения величин $\delta^{18}O$ проводилась методом лазерного фторирования (ЛФ) на опции «лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов» в присутствии реагента BrF_5 по методу [Sharp, 1990]. Для изотопного анализа кислорода применяли только чистые минералы (в виде осколков) общим весом 1.5—2.5 мг. Расчеты $\delta^{18}O$ были выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного ИГЕМ РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}O$ находилась на уровне $(1s) \pm 0.2 \text{ ‰}$.

Для реконструкции эпигенетического минералого- и породообразования, факторов осадочного породообразования использованы литологические методы исследования: стадийный анализ, генетический анализ и литолого-фациальный анализ первично-осадочных отложений.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ БУРАЛ-САРДЫКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бурал-Сардыкское месторождение кварцитов расположено в юго-восточной части Восточного Саяна на гребне одноименной горы с высотными отметками 2600—2670 м. Данное месторождение и ряд других проявлений (Урунгенурское, Монгошинское, Окинское-1, Окинское-2, Урда-Гарганское, Снежное, Улзытинское и др.) включены в Гарганскую кварценосную зону, которая, в свою очередь, входит в состав Восточно-Саянской кварценосной провинции.

По результатам полевых и камеральных исследований нами составлена геологическая карта Бурал-Сардыкского месторождения, стратиграфическая колонка по южному склону горы Бурал-Сардык, геологический разрез по линии А—В (рис. 1). В качестве продуктивной толщи на месторождении выступает осадочно-метаморфогенная терригенно-карбонатно-кремнистая толща иркутной (монгошинской) свиты предположительно мезопротерозойского (среднерифейского) возраста, нормально залегающая непосредственно на гранитоидных кристаллических фундаментах Гарганской глыбы [Семейкин, 2009]. Интрузивные образования на месторождении представлены гранитоидами сумсунурского комплекса с возрастом 790 млн лет [Кузьмичев и др., 2000] и предположительно породами холбинского комплекса. Гранитоиды сумсунурского комплекса развиты в южной, юго-западных частях месторождения (см. рис. 1), представляя собой периферийную (окраинную?) зону крупного дискордантного и дисгармоничного Гарганского плутона (массива?), сложенную преимущественно гранодиоритами, плагиогранитами и в гораздо меньшем объеме кварцевыми диоритами, диоритами, а также габбро и габбро-диоритами (менее 1 % от всего объема пород). Породы холбинского комплекса образуют мелкие штоки, дайки риолит-порфиров, дацитов, плагиопорфиров, порфиритов, андезитов.

Внедрение гранитоидов сумсунурского комплекса сопровождается скарнированием карбонатов, замещением последних тремолитсодержащими и анхимономинеральными амфиболовыми (в основном тремолитактинолитового ряда) скарнами. Скарнирование выражено весьма интенсивно и распространяется на многие десятки метров от непосредственного интрузивного контакта.

Базальный горизонт предиркутной свиты по долине р. Топхор-Жалга (левый приток р. Урик), по данным И.Н. Семейкина и др. [2009] и нашим новым наблюдениям, представлен аркозовыми метапесчаниками (5—30 м), переслаиванием кварцевых алевролитов с алевроглинистыми (серицитовыми) сланцами (10—40 м). Выше лежат известняки и доломиты со строматолитами и горизонтом черных углистых кварц-серицитовых сланцев (50—160 м). Выше по разрезу залегают кварцевые метапесчаники, метаалевролиты иркутной свиты, которые сменяются углисто-серицит-кремнистыми сланцами (10—30 см). Выше лежат кремнистые доломиты (10—20 м), которые постепенно переходят в кварциты — высококремнеземные породы продуктивного горизонта (рис. 2). Видимая мощность высококремнеземных пород варьирует от 150—200 м, протяженность до 1 км. Приблизительная мощность пластообразных темно-серых, почти черных микрокварцитов варьирует от 150—170 м, светло-серых, серых осветленных полосчатых кварцитов, по нашим данным, от 5 до 7 м, белых среднезернистых кварцитов от 8 до 12 м, «суперкварцитов» от 7 до 14 м. В целом высококремнеземные продуктивные тела имеют пластообразную форму с пологим погружением на северо-запад под углом до 30°. Аналогичное падение имеет слоистость в темно-серых и серых микрокварцитах, что, вероятно, соответствует первичным седиментационным текстурам. В осветленных разностях кварцитов углы падения полосчатости варьируют от 10 до 70°, что связано с вторичными преобразованиями микрокварцитов, о чем подробнее будет рассмотрено ниже. Тела высококремнеземных пород вместе с вмещающими породами разорваны и смещены разрывными дислокациями преимущественно северо-западных направлений на блоки. Некоторые разрывы вмещают дайки (см. рис. 1).

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ, ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Осадочно-метаморфогенная терригенно-карбонатно-кремнистая толща иркутной (монгошинской) и предиркутной свит в пределах месторождения сложена аркозовыми метапесчаниками, кварцитовидными песчаниками, кварцевыми метаалевролитами, кварцитами, известковыми и доломитовыми мраморами, скарнами, кварц-серицитовыми и углисто-серицит-кремнистыми сланцами.

Известковые и доломитовые мраморы, кремнистые доломиты слагают пластовые тела различной мощности, зачастую выходят на поверхность в виде дезинтегрированных глыб, на окремненных разностях наблюдаются каверны выщелачивания карбонатного вещества. В мраморах и кальцифирах основная масса сложена кальцитом и доломитом, в подчиненном количестве (до 3 % в мраморах,

5—10 % в кальцифирах) присутствуют диопсид и волластонит, из вторичных минералов наблюдаются единичные агрегаты хлорита и эпидота. В данных породах также присутствует кварц: от немногочисленных следов (до 3—5 %) вплоть до прожилков, секущих основную массу под разными углами, мощностью до нескольких сантиметров. Окраска варьируется от темно-серого (содержат углистое веще-

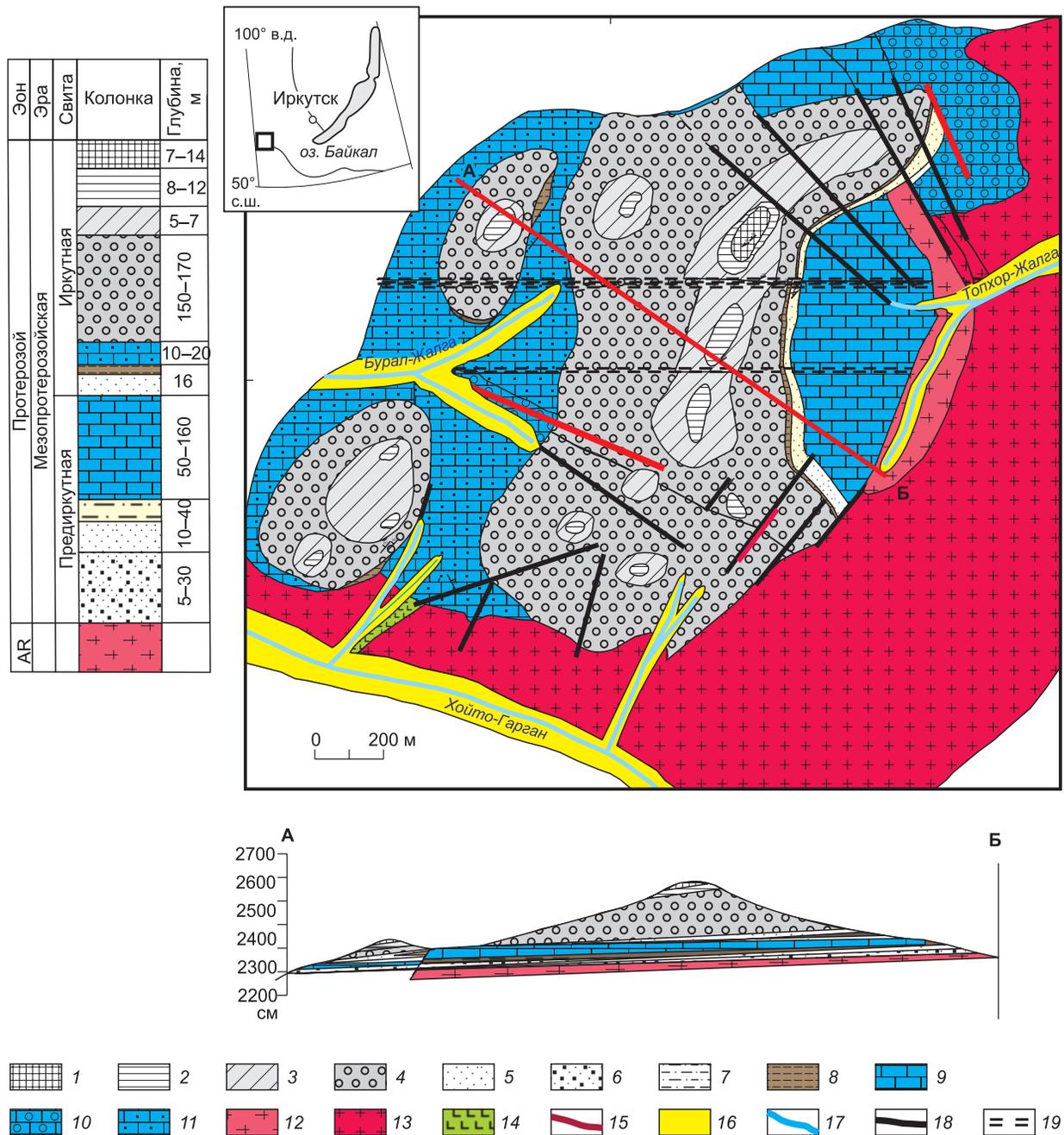


Рис. 1. Геологическая карта Бурал-Сардыкского месторождения кварцитов.

По материалам Е.И. Воробьева (2001), В.П. Табинаева, А.М. Рогачева, С.Д. Цуцара (2002), А.М. Федорова (2011) с дополнениями и исправлениями Д.Ц. Ауржанаевой, А.М. Федорова, Э.А. Очировой, А.И. Непомнящих, Д.И. Сычева.

Терригенно-карбонатно-кремнистый комплекс иркутской свиты: 1 — суперкварциты; 2 — белые мелкозернистые кварциты; 3 — светло-серые, серые осветленные полосчатые кварциты; 4 — темно-серые, почти черные кремневидные микрокварциты; 5 — кварцевые метапесчаники; 6 — аркозовые метапесчаники; 7 — переслаивание кварцевых алевролитов с алевроглинистыми (серичитовыми) сланцами; 8 — углисто-серичит-кремнистые сланцы; 9 — известняки, доломиты, мраморы; 10 — скарны и скарнированные породы; 11 — кремнистые карбонаты. Метаморфизованный нерасчлененный комплекс основания Гарганской глыбы: 12 — гнейсы, гнейсодиориты и гнейсограниты; сумсунурский комплекс: 13 — тоналиты, гранодиориты, граниты, диориты, габбро-диориты; барун-холбинский комплекс: 14 — мелкий шток диабазов, 15 — дайки порфириров; четвертичные отложения: 16 — аллювиальные отложения; 17 — реки; 18 — разломы; 19 — зоны милонитизации.

Рис. 2. Постепенный контакт кремневидного темно-серого, серого микрокварцита с осветленными микрокварцитами.



ство) до светло-серого и белого цветов. Структура гранобластовая, гетерогранобластовая, мелкосреднезернистая, текстура массивная, полосчатая (рис. 3, а, б). По результатам изотопно-геохимических данных ряда исследователей [Летникова, 2005], карбонатные отложения иркутской свиты отнесены к субплатформенным обстановкам карбонатакопления, для которых характерны мелководные шельфовые обстановки при пассивном тектоническом режиме.

Скарны встречаются в виде прожилков и жил различной мощности, залегающих в доломит-известковой толще. Это породы серой, светло-серой, зеленовато-серой и зеленой окраски со скрытозернистой структурой и массивной текстурой, реже мелкозернистой, нематобластовой структурой и массивной либо полосчатой текстурой (см. рис. 3, в). Главные минералы скарнов представлены амфиболами тремолит-актинолитового ряда и магнезиальной роговой обманкой, кальцитом, доломитом, пироксенами (диопсид, волластонит, авгит), а также в небольшом количестве хлоритом, флогопитом и тальком; в некоторых пробах присутствует серпентин. Среди аксессуарных минералов встречается титанит, эпидот, рутил, апатит, циркон.

Углисто-серицит кремнистые сланцы представлены в виде небольших прослоев среди кремнисто-карбонатных пород. Данные образования сложены кварцем (60—65 %), серицитом (25—30 %) и

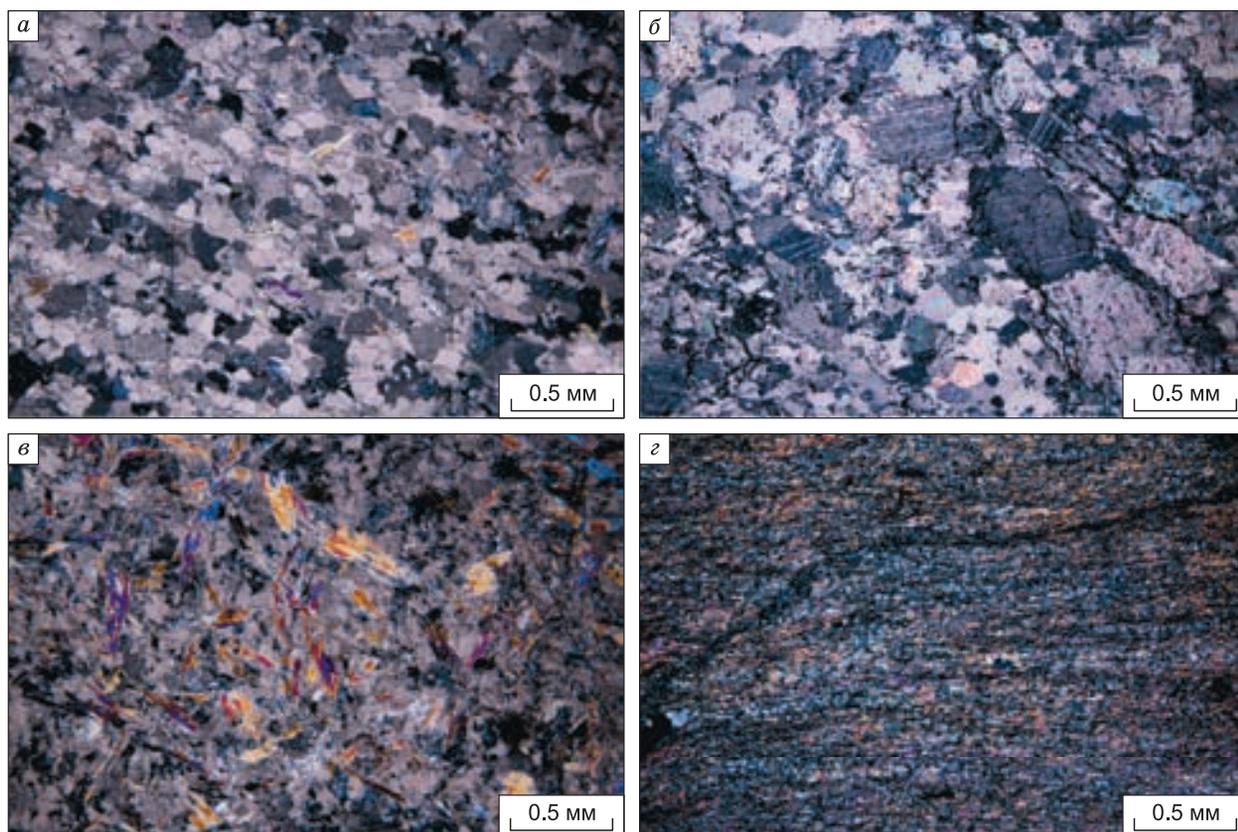


Рис. 3. Доломитовый мрамор (а), кальцитовый мрамор (б), амфиболовый скарн (в), углисто-серицит-кремнистый сланец (г).

Фото при скрещенных николях (×4).

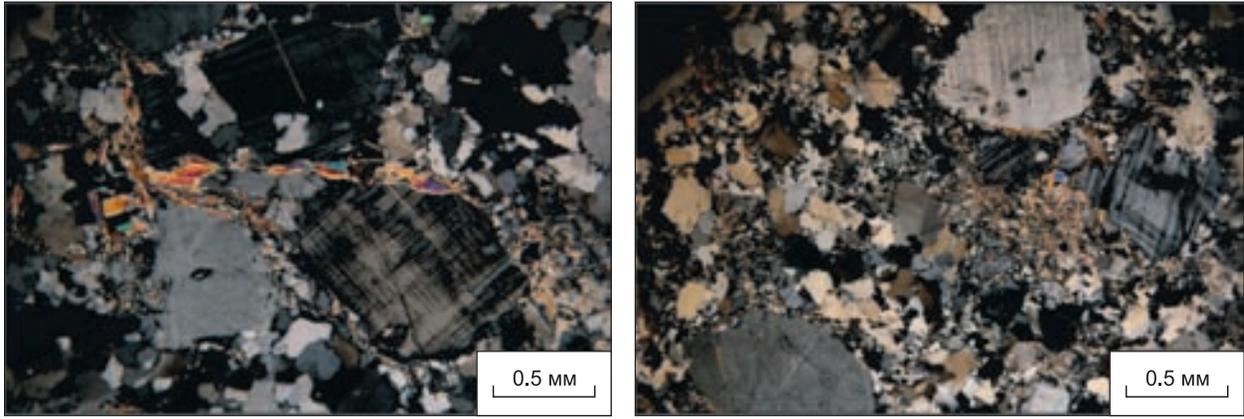


Рис. 4. Обр. БС-9-14. Аркозовый песчаник с бластопсаммитовой структурой, цемент преимущественно кварцевый с конформно-регенерационными структурами ($\times 4$), николи +.

углистым веществом (5—10 %). Структура лепидобластовая, мелкозернистая, скрытозернистая в прослойках, сложенных большим количеством углистого вещества, мельчайшими чешуйками серицита, примесью кварца, минералами из группы хлорит-сerpентина и гидроксидов железа (см. рис. 3, 2). В кварцевых прослойках структура гранобластовая, резко неравномерно-зернистая, где встречаются чешуйки серицита, гидроксидов железа и примесь углистого вещества.

Аркозовые метапесчаники, метаалевролиты, кварцитовидные песчаники. Аркозовые метапесчаники сложены преимущественно кварцем, полевыми шпатами с примесью слюды. Содержание полевых шпатов более 20 %. Цемент сильно перекристаллизован, в связи с этим структуры пород стилолитовые, шиповидные, бластопсаммитовые, текстуры слоистые (рис. 4). Кварцитовидные песчаники состоят из кварца более чем на 95 %, цемент кварцевый с примесью серицитовых чешуек. Метаалевролиты представлены более тонкозернистыми кварцевыми зёрнами, цемента практически не видно, структура преимущественно бластоалевритовая, текстура слоисто-полосчатая. Мономинеральный кварцевый состав обломочных пород отвечает высокой стадии развития химического выветривания (каолинитовой или латеритной), в то же время полимиктовый аркозовый состав обломков свидетельствует о низкой стадии химического выветривания (дезинтеграции). Так как одновременно развиваться на небольшой площади такие контрастные профили коры выветривания, характеризующие разную климатическую обстановку, не могут, И.Н. Семейкин аркозовый горизонт отнес к предрекрутной свите [Семейкин, 2009].

Кварциты продуктивного горизонта. нами выделен следующий ряд высококислых разновидностей кварцитов (разрез снизу вверх): 1) углеродсодержащие тонкозернистые темно-серого до черного цвета с массивной, пятнисто-полосчатой, реже слоистой текстурой — графитистые микрокварциты; 2) в разной степени осветленные от светло-серого до белого цвета микрокварциты; 3) белые среднезернистые гранулированные кварциты; 4) «суперкварциты» — перекристаллизованные кварциты, мономинеральные породы белого, серовато-белого цвета, со специфической грубо-неравномернозернистой, часто «порфировидной» структурой, являющиеся сверхчистым кварцевым сырьем. Четких границ между выделенными разновидностями не наблюдается (рис. 5).

Графитистые микрокварциты составляют большую часть объема всех кварцитов месторождения и представляют собой темноокрашенные (от темно-серого до черного) массивные породы, местами пятнисто-полосчатой со слабовыраженной первичной слоистостью. Содержание кварца в них достигает 98—99 %, тонкодисперсного углеродистого вещества — 0.5—2.0 %, в качестве примесей могут присутствовать серицит, кальцит, гематит, эпидот, единичные выделения игольчатого турмалина, рутила, циркона и рудных минералов. Структура пород конформная, кварцевые зёрна размером 0.001—0.050 мм соединены конформно, плотно заполняют пространство, имеют лапчатую, амёбовидную форму. Текстура сланцеватая (см. рис. 5, 1а, 1б). ГЖВ мало, встречаются мелкие двухфазовые включения размером 2—5 мкм.

Осветленные серые микрокварциты сложены кварцем (>98—99 %), углеродистым веществом (<1 %); встречаются включения циркона, рутила, серицита, гематита, монацита, ксенотима. Углеродистое вещество в этой разновидности присутствует в значительно меньшем количестве по сравнению с предыдущим, макроскопически это проявляется более светлой окраской породы. В шлифах устанавливается структура по крайней мере двух уровней (см. рис. 5.2, 5.3). Относительно более крупная — зёрна кварца размером 0.05—0.28 мм с волнистым погасанием с мелкосреднезернистой, начально-бластиче-

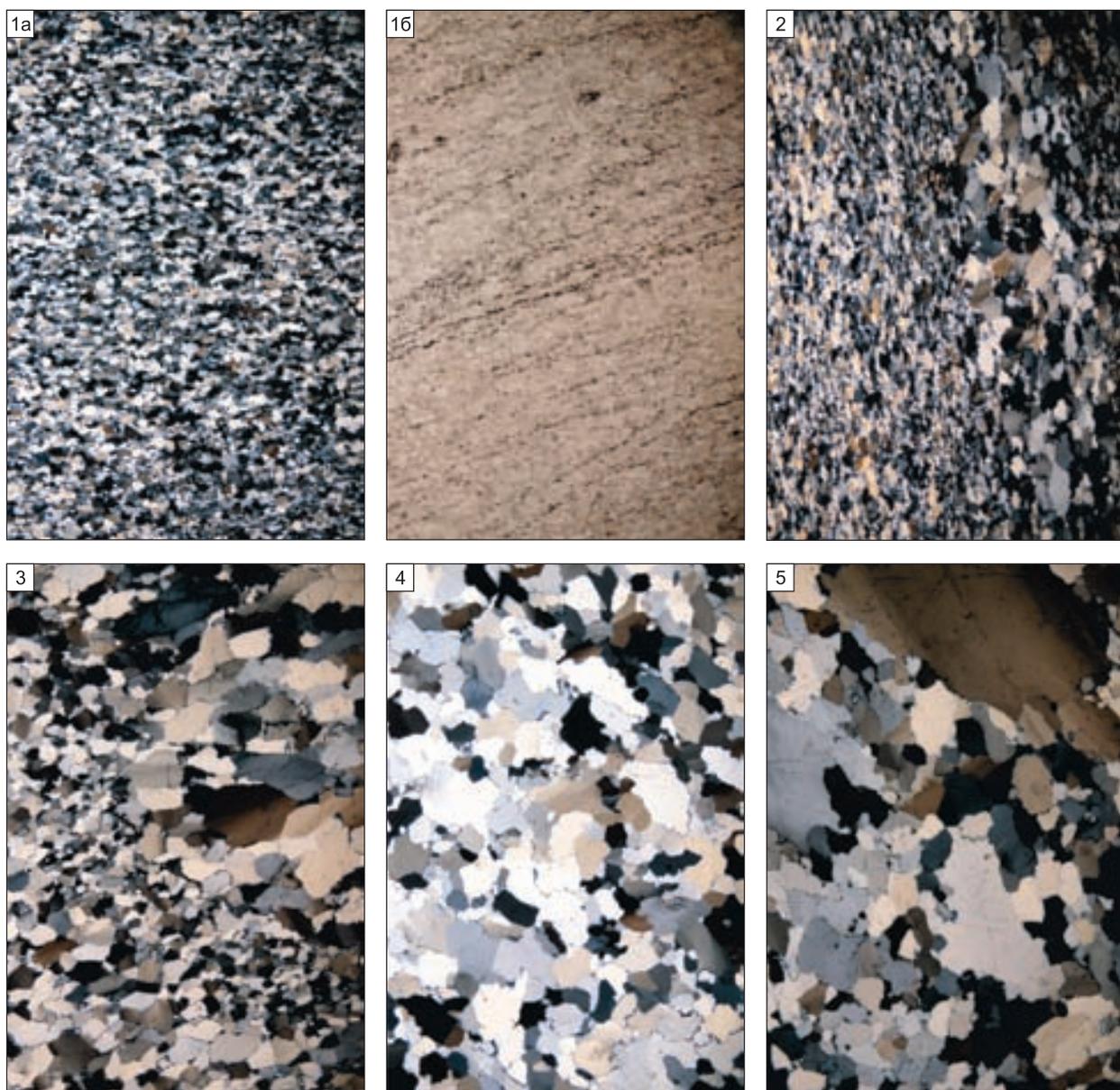


Рис. 5. Кварциты продуктивного горизонта.

1а — графитистые микрокварциты, николи +, 1б — графитистые микрокварциты, николи ||, 2 — осветленные серые микрокварциты, 3 — осветленные светло-серые микрокварциты, 4 — белые среднезернистые кварциты, 5 — суперкварциты.

ской структурой и более мелкозернистая часть представлена кварцевыми зернами размером 0.001—0.050 мм, которые имеют лапчатую, амёбовидную форму. Структура пород конформная, начально-бластическая, текстура сланцеватая (см. рис. 5.2). Волнистое погасание кварцевых зерен свидетельствует о пластической деформации пород. ГЖВ в мелкозернистых частях мелкие двухфазовые размером 4—5 мкм, в более крупных зернах — 11—20 мкм, двухфазные, полифазные.

Светло-серые, белые гранулированные кварциты представляют с собой массивные среднезернистые (0.2—0.5 мм) породы с гранобластовой структурой (см. рис. 5.4). Погасание у кварцевых зерен преимущественно однородное, без следов деформации. ГЖВ представлены мелкими 2—4 мкм двухфазовыми включениями, примесные минералы — единичными включениями серицита, примазками гематита.

«*Суперкварциты*» характеризуются мономинеральным составом (содержание кварца >99.9 %), из примесей могут присутствовать единичные включения серицита или мелких гематитовых псевдоморфоз по сульфидам. Основная масса сложена преимущественно новообразованными мелкими зернами (0.04—0.05 мм) с ровными контурами и облачным погасанием. Более крупные разности (1.7—2.0 мм)

**Результаты содержания петрогенных и редких элементов
в гранитогнейсах Гарганского фундамента и в аркозовых
песчаниках предиркутной свиты**

Компо- нент	Гранитогнейс		Песчаник	
	БС-116-15	БС-119-15	БС-113-15	БС-114-15
SiO ₂	73.10	69.80	76.00	71.00
TiO ₂	0.10	0.23	0.02	0.11
Al ₂ O ₃	14.30	14.20	13.90	16.30
Fe ₂ O ₃	0.46	0.48	0.25	0.41
FeO	0.68	1.55	0.32	0.58
MnO	0.02	0.03	0.02	0.01
MgO	0.35	0.89	0.24	0.93
CaO	1.27	2.72	0.35	0.51
Na ₂ O	4.56	4.12	7.01	5.71
K ₂ O	3.80	2.25	0.64	2.75
P ₂ O ₅	<0.1	<0.10	<0.10	<0.10
П.п.п.	0.60	3.23	0.54	1.52
Сумма	99.24	99.50	99.29	99.83
CO ₂	0.22	1.98	0.22	0.22
La	30.4	27.3	3.94	5.23
Ce	50.6	46.5	8.92	11.5
Pr	5.00	4.80	<2	<2
Nd	17.0	18.6	4.20	4.36
Sm	3.62	4.16	<1.5	<1.5
Eu	0.59	0.95	0.17	0.23
Gd	2.05	2.76	<2	<2
Tb	<1	<1	<1	<1
Dy	1.40	2.22	1.20	<1
Ho	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Er	0.67	1.31	0.66	<0.5
Tm	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Yb	0.45	1.14	0.53	0.35
Lu	<0.15	0.21	<0.15	<0.15
Y	6.61	12.2	6.56	4.04

Примечание. Анализы выполнены силикатным и ICP-AES методами в ЦКП ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) Л.В. Митрофановой, А.А. Цыреновой, Т.Г. Хумаевой, О.В. Корсун.

таноидов в аркозовых метапесчаниках варьирует от 3.94 до 11.0 г/т, в плагиогнейсах фундамента (27.3—50.0 г/т). Концентрация тяжелых лантаноидов в породах в целом остается примерно на одном уровне, не превышая 2 г/т, лишь в плагиогнейсах увеличиваясь до 2.76 г/т (таблица). Графики распределения РЗЭ в аркозовых песчаниках и плагиогнейсах представлены на рис. 6. Они указывают на некоторое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми. В аркозовых песчаниках отрицательная аномалия Eu не наблюдается, тогда как в плагиогнейсах слабо выражена. Следовательно, обобщая вышесказанное, можно предположить, что аркозовые песчаники образовались по плагиогнейсам, являясь продуктом выветривания пород фундамента Гарганской глыбы.

Изотопный состав кислорода. Результаты изотопного анализа $\delta^{18}\text{O}$ по кварцу в разных типах пород месторождения, проведенного в Аналитическом центре ГИН СО РАН, показаны на рис. 6, 7. Для большинства силикатных пород значения $\delta^{18}\text{O}$ лежат в пределах от +5 до +15 ‰. В частности, для гранитов характерны значения -10...+17 ‰ (общий разброс) [Taylor, 1978], при этом в тех случаях, когда контаминация коровым веществом может быть исключена, $\delta^{18}\text{O}$ в гранитах не выходит за пределы +6...+7. Любые отклонения от этого интервала можно рассматривать как свидетельства контаминации магмы коровым веществом [Миронов, 2000]. Для кислых пород Бурал-Сардыкского месторождения

представлены извилистыми краями зерен и волнистым погасанием, характерным признаком пластической деформации. Структура неравномерно-зернистая гранобластовая, текстура массивная, сланцеватая (см. рис. 5.5). ГЖВ представлены в основном двухфазовыми мелкими 4—5 мкм включениями, встречаются включения размером до 12 мкм. Специально изучением ГЖВ в кварцитах разных типов Бурал-Сардыкского месторождения занималась М.Г. Волкова, результаты ее исследований показали, что концентрация солей во флюиде варьировала от 5 до 9 мас. % экв. NaCl, температура гомогенизации в жидкость составила от 189 до 235 °С, давление от 1.8 до 2.3 кбар [Волкова и др., 2017]. Нами было проведено несколько термометрических экспериментов по ГЖВ в кварце суперкварцитов. Максимальная температура гомогенизации двухфазовых включений составила 335—337 °С, что на 100 °С выше значений, полученных М.Г. Волковой.

Геохимическая характеристика пород. С помощью прецизионных геохимических исследований А.М. Федоровым и др. выявлена уникально высокая химическая чистота кварцитов продуктивного горизонта, содержание примесных компонентов в черных и темно-серых кремневидных кварцитах составляет около 400 г/т, в светло-серых и серых разновидностях — 250 г/т и около 100 г/т в «суперкварцитах». К основным загрязнителям отнесены Al, Fe, Ca, Mg, Ti [Федоров и др., 2012].

С целью определения генетической связи аркозовых песчаников предиркутной свиты и плагиогнейсов фундамента нами изучен их химический состав. Сравнение геохимических данных плагиогнейсов, аркозовых метапесчаников показало, что поведение кривых распределения РЗЭ в целом ведут себя похоже, содержание легких лан-

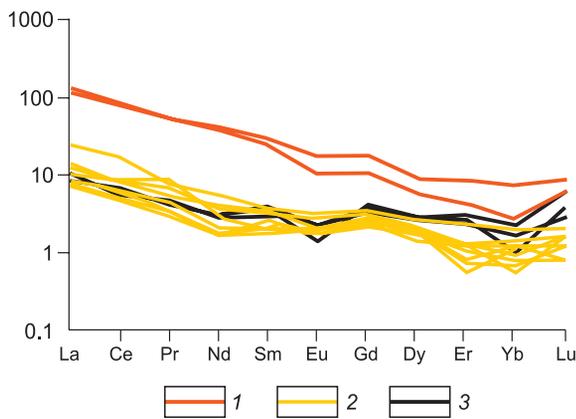


Рис. 6. График нормированных по хондриту редкоземельных элементов в песчаниках, кварцитах и плагинейсах Бурал-Сардыкского месторождения (стандарты, по [McDonough, Sun, 1995]).

1 — плагинейсы гарганского метаморфического комплекса; 2 — аркозовые метапесчаники; 3 — серые микрокварциты.

(гранодиоритов и плагинейсов) значения $\delta^{18}\text{O}$ лежат в пределах +9.1... +11.3 ‰, что свидетельствует о некоторой контаминации их коровым веществом (см. рис. 7).

Осадочные породы характеризуются обогащенностью $\delta^{18}\text{O}$ относительно SMOW и значения $\delta^{18}\text{O}$ лежат в пределах от +10 ‰ (кварцевые песчаники) до +35 ‰ (кремни-силициты). Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ для аркозовых кварцито-песчаников месторождения варьируют от +12.0...+17.4 ‰, что соответствует значению для аркозовых песчаников и кварцитов обломочного происхождения. Для морских известняков, отложившихся в недавнее время, значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от +28...+30 ‰, при этом наблюдается уменьшение этих значений с увеличением геологического возраста пород (для пород кембрийского возраста $\delta^{18}\text{O} = +20...+22$ ‰). Таким образом, для морских известняков получен широкий разброс значений от +20...+22 до +28...+30 ‰ [Fedorov et al., 2019]. В карбонатах месторождения значения $\delta^{18}\text{O}$ принимают значения от +18.7 до +22.7 ‰, что может свидетельствовать о древнем возрасте морских осадков.

Для кварцитов неопротерозойского периода (R₃-V) характерны значения $\delta^{18}\text{O}$ в интервале +20...+30 ‰ [Bindeman et al., 2016]. Для высокочистых кварцитов продуктивного горизонта получены значения $\delta^{18}\text{O}$ в интервале +29.2...+29.8 ‰, соответствующее кремням (силицитам). Наиболее чистые кварциты Бурал-Сардыкского месторождения (суперкварциты) имеют значения +29.8 ‰, серые и темно-серые микрокварциты +29.2...+29.7 ‰; «приконтактные» кварциты (залегающие у контакта с гранитоидами) имеют значения +26.3...+27.1 ‰ (рис. 8). При этом, по А.М. Федорову, «приконтактные» кварциты характеризуются довольно высокими содержаниями породообразующих и редкоземельных элементов по сравнению с разновидностями, максимально удаленными от контакта. Так, в «приконтактных» кварцитах содержание следующих элементов выше по сравнению с темно-серыми кремневидными микрокварцитами пластовых тел: Mn, Fe, Ca, Na, K, B и Zr в 10—20 раз, Ti, Li, Sc, Sr и Ba в 20—30 раз, Al, V, Rb, Cs примерно на два порядка. Иными словами, произошло геохимическое «загрязнение» кварцитов. Таким образом, в приконтактной зоне у кварцитов наблюдается снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ и привнос гранитофильных элементов, что связано со скарнированием вмещающих пород [Fedorov et al., 2019]. В целом изотопные значения кислорода в кварцитах продуктивного горизонта и во вмещающих осадочно-метаморфических породах свидетельствуют о морском генезисе отложений, изотопные метки которых сохранились при их метаморфизме. Миграция компонентов в процессе метаморфических преобразований происходила за счет собственной флюидной составляющей пород.

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КВАРЦИТОВ

Терригенно-карбонатно-кремнистые осадки после накопления в морском бассейне претерпели все стадии литогенеза. Кроме того, данная территория претерпела несколько этапов тектонической и магматической активизации, на что указывают разновозрастные магматические породы и разрывные нарушения. Тепловое и механическое (условия стресса) воздействие их на вещество осадочных пород привело к активизации собственных, сконцентрированных в породном бассейне газонасыщенных флюидов, которые становились неравновесными с вмещающей средой, что ускоряло химические про-

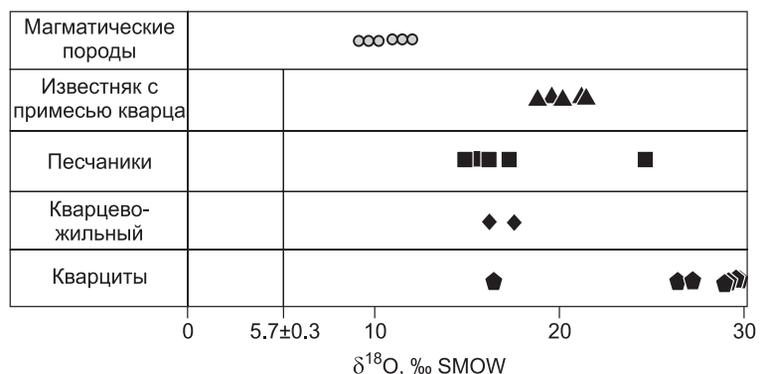
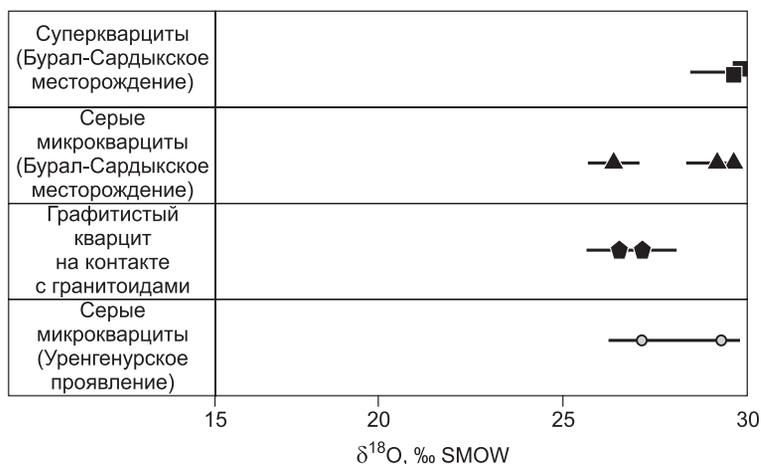


Рис. 7. Изотопный состав кислорода в кварце из различных источников.

Рис. 8. Изотопный состав кислорода в кварцитах продуктивного горизонта.



цессы, протекавшие при постседиментационных преобразованиях или «вторичных изменениях» осадочных пород. В связи с этим происходило перераспределение компонентов в высококремнеземных породах. Первично-осадочные аркозовые песчаники с базального горизонта и песчаники на карбонатном цементе, а также кремнистые породы (силициты) преобразовались в кварциты.

Механизм постседиментационных преобразований высококремнеземных пород детально описан в многочисленных работах [Григорьев, 1961; Симанович, 1978; Япаскурт, 1999, 2013; и др.]. В процессе изучения и анализа материалов по Бурал-Сардыкскому месторождению нами установлены все стадии преобразования высококремнеземных пород, что было прослежено и установлено О.В. Япаскуртом [1999] на примере изучения метапесчаников верхоянского комплекса, кварцитов кумолинской свиты Улутауского поднятия в Центральном Казахстане.

Ниже приводятся результаты стадийного анализа высококремнеземных пород продуктивного горизонта. На ранних этапах постседиментационных преобразований, в стадию катагенеза, по мере уплотнения пород в местах контактов кварцевых зерен локализовались максимально высокие давления, которые способны активизировать процесс химического растворения минерала. Повышение температуры влияет на изменения рН межзерновых растворов, в связи с чем также ускоряются химические реакции. При наличии флюидных потоков, движущихся по порам, дефектам кристаллов или в виде пленок по поверхности зерен, процессы разупорядочения кристаллов и диффузии резко возрастают [Поспелов, 1973]. Если в кварцитах присутствуют примесные компоненты, такие как глинистые пленки, органическое вещество, то они, вероятно, действовали как катализаторы растворения под давлением. Растворение кремнезема под давлением обуславливает переотложение кварца в участках пониженных давлений с образованием регенерационного кварца, при этом формируются структуры гравитационной коррозии и регенерации, такие как конформные (выпукловогнутые), микростиллолитовые (равномерно-пильчатые) или инкорпорационные (зубчато-клиновидные) границы между плотно прижатыми друг к другу кварцевыми зернами. Массовые проявления таких структур, по мнению [Япаскурт, 1999], принадлежат к числу важных индикаторов глубокого катагенетического преобразования исследуемой породы. В темно-серых графитистых и осветленных серых и светло-серых микрокварцитах сохранились структуры гравитационной коррозии и регенерации (рис. 9, а, б).

Термальная аномалия, характеризующая переход от стадии катагенеза к метагенезу (начальный метаморфизм), порождает необратимые изменения в кварце, появляются признаки деформации при повышении геостатического давления вышележащих пород в ряде случаев тангенциальных напряжений — стресса, т. е. деформации, сначала упругой, затем пластической. При этом возникают внутренние напряжения в кварцевых зернах, такие как волнистое угасание, блочность, деформационное пластинкование, обусловленные скоплениями дислокаций, расположенных в различном порядке с потерей химической связи между компонентами, в результате чего они переходят в подвижное состояние. Такие дислокации, по [Симанович, 1978], являются носителями повышенной свободной энергии исходных кварцевых зерен. Получив избыточную энергию, химические компоненты мигрируют из тех участков, где они были предельно активированы, поглощая соседние зерна целиком. Дальнейшее переотложение кварца приводит к его перекристаллизации в преимущественном направлении существующих зерен (см. рис. 9, а).

При прогреве до температур, соответствующих стадиям метагенеза и регионального метаморфизма, по-видимому, рекристаллизационные контакты взаимного бластического замещения кварцевых зерен осложняются грануляцией — возникновением в участках контакта разноориентированных мелких кварцевых индивидов. При более интенсивном развитии грануляция не только поражает периферические части зерен, но нередко частично или полностью их преобразует в мелкозернистый кварцевый агрегат. Механизм грануляции складывается из двух этапов: создание в кристаллах кварца нарушенных областей (собственно грануляция) в результате их деформации и последующей рекристаллизации (рост

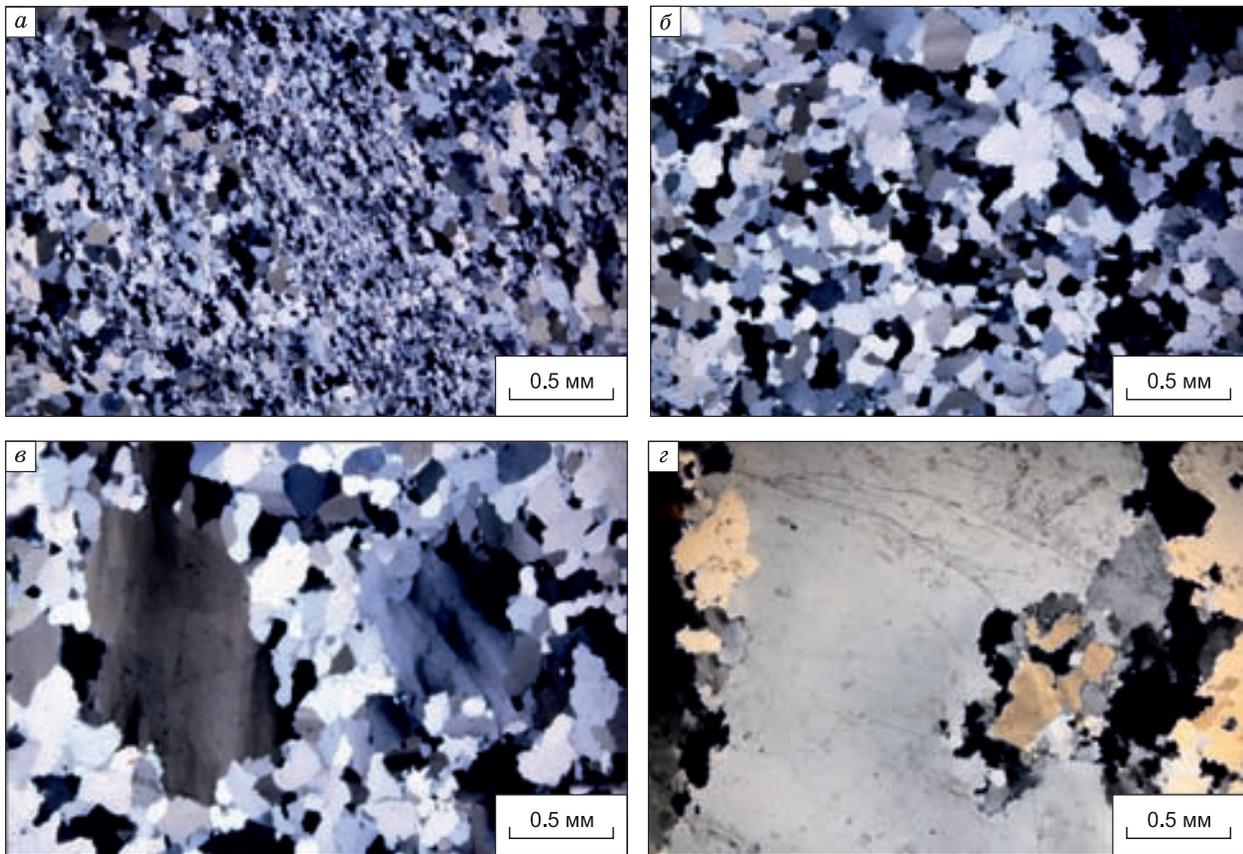


Рис. 9. Порода продуктивного горизонта верхоянского комплекса.

а — серый микрокварцит с участками осветления со структурами гравитационной коррозии и регенерации (конформные). Текстура сланцеватая. Фото при + ($\times 4$). *б* — светло-серый микрокварцит. Слева внизу новообразованные оптически однородные кварцевые зерна, с прямым погасанием и без следов деформации, формируются гранобластовые структуры. Справа сверху фрагменты исходных зерен со сложными зубчатыми границами, структура рекристаллизационно-грануляционного бластеза на границах, регенерированных и вдавненных друг в друга кварцевых зерен со следами деформации. Фото при + ($\times 4$). *в* — суперкварцит с характерной псевдопорфиробластовой структурой. Показан крупный реликт деформированного индивида (псевдопорфиробласт) среди мелкосреднезернистого агрегата со сложными зубчатыми границами. Основная ткань сложена новообразованными оптически однородными кварцевыми зернами, с прямым погасанием и без следов деформации с гранобластовой структурой. Фото шлифа при + ($\times 4$). *г* — кварцевая жила в кварците. Фото шлифа при + ($\times 4$).

новых свободных от деформации зерен), причем нарушенные области в этом случае играют роль центров роста новообразованных индивидов. Такими нарушенными областями в кварце могут быть перориентированные блоки между микротрещинами скалывания. Как отмечал Ф.П. Григорьев [1961], новообразованные зерна занимают иное по сравнению с матрицей положение, отклоняясь от исходной ориентировки на значительные углы. Мелкие зерна сравнимы с шириной полос деформации и находятся в незакономерном положении относительно деформированной матрицы. В своих исследованиях Л.Я. Кабанова [2016] отмечала, что при пересечении полос пластической деформации слойки новообразованного кварца расчленяют индивиды исходного кварца на фрагменты и, разрастаясь, создают «псевдопорфиробластовую» структуру кварцевого агрегата с микрогранобластовой структурой основной ткани. Новообразованные зерна оптически были однородны, имели прямое погасание и не содержали никаких следов деформации. Зерна новообразованного кварца обычно характеризуются простыми прямолинейными границами, а фрагменты исходных зерен отличаются зубчатыми, ступенчатыми и зубчатоступенчатыми границами. Она пришла к выводу, что кварцевые порфиробласты являются реликтами обломочного кварца.

Подобные структуры наблюдаются в осветленных светло-серых микрокварцитах и суперкварцитах (см. рис. 9, б, в). Однако результаты наших исследований не совпадают с выводами Л.Я. Кабановой [2014]. Нами установлено, что образование кварцевых порфиробластов связано с перекристаллизацией кварцевых зерен микрокварцитов, сформированных по силицитам, и они не являются реликтами обломочного кварца. Основная ткань образовалась в результате грануляции кварцевых порфиробластов.

При метаморфизме, соответствующем эпидот-амфиболитовой фации, наблюдается явление собирательного бластеза, собирательной рекристаллизации, т. е. роста более крупных кварцевых индивидов за счет недеформированных более мелких. В этом процессе в связи с дальнейшим повышением температуры значительную роль начинает играть поверхностная энергия границ зерен, которая стремится снизиться за счет уменьшения общей площади кварцевых индивидов. Кроме того, следствием влияния поверхностной энергии границ зерен является тенденция к их выпрямлению и укорачиванию. Как было ранее установлено [Симанович, 1978], границы «двигаются» по направлению центров их кризисности. В связи с этим формируются массивные крупно- и гигантозернистые кварцевые жилы среди кварцитов (см. рис. 9, з), которые встречаются в локальных участках, в связи с этим мы не видим широкого развития по всей площади месторождения.

Детальными комплексными исследованиями нами выявлено, что высокочистые кварциты Бурал-Сардыкского месторождения сформированы в процессе стадийных преобразований осадочных высококремнеземных пород, которые происходили в несколько этапов:

- 1) растворение кварцевых зерен под давлением с образованием структур гравитационной коррозии на стадии катагенеза; 2) перекристаллизация с увеличением в преимущественном направлении размеров существующих зерен при переходе от стадии катагенеза к метагенезу (начальный метаморфизм); 3) первичная рекристаллизация — рост новых неискаженных зерен за счет искаженных с уменьшением размеров других зерен при грануляции с образованием гранобластовой структуры на стадиях метагенеза и регионального метаморфизма; 4) собирательная рекристаллизация — рост более крупных кварцевых индивидов за счет недеформированных более мелких с образованием кварцевых жил.

Что касается роли метасоматоза, то в продуктивном горизонте прослеживается вынос примесных компонентов, повторная кристаллизация новых кварцевых минералов за счет старых с укрупнением зерен, затем происходит их грануляция, что приводит к уменьшению размеров кварцевых зерен. Миграция компонентов осуществлялась при диффузии, однако в целом химический состав в пределах горизонта не изменился. Это позволяет сделать вывод, что роль метасоматоза в формировании высокочистых кварцитов была незначительной.

Однако ниже по разрезу залегают окремненные карбонаты, в которых наблюдается метасоматическое замещение карбонатов кварцевым веществом, т. е. происходили процессы окварцевания. Окварцеванию подверглись и аркозовые песчаники из базального горизонта и гранитоиды сумсунурского комплекса.

Динамометаморфиты или стресс-метаморфические тектониты. В связи с тем, что вся толща претерпела несколько этапов тектонической и магматической активизации, в локальных участках осуществлялись преимущественно динамометаморфические преобразования высококремнеземных пород. По мнению Б.М. Чикова [1988], температурный фактор, возникающий в связи с разогревом минеральных масс вследствие сжатия и трения при относительном перемещении контактирующих массивов, во многих случаях обеспечивает тот же результат преобразований минералов. Таким образом, энергетика стресс-системы тоже могла быть дополнительным фактором перекристаллизации высококремнеземных темно-серых пород в осветленные разности кварцитов с образованием формаций стресс- или динамометаморфического типа — стресс-метаморфических тектонитов, широко описанных в литературных источниках.

Кроме того, в разломе широтного простирания, расположенного к югу от продуктивного тела суперкварцитов и микрокварцитов, обнаружены катакластические тектониты (катаклазиты).

Таким образом, на Бурал-Сардыкском месторождении можно выделить две основные разновидности тектонитов: катакластические тектониты (катаклазиты), образовавшиеся в результате хрупкого разрушения пород, и стресс-метаморфические тектониты (стресс-тектониты), сформированные при пластическом течении пород.

Характерной особенностью данных образований является брекчиевидная текстура пород. На Бурал-Сардыкском месторождении среди темно-серых, серых графитистых микрокварцитов наблюдаются участки осветления с брекчиевидной текстурой пород (рис. 10). Мы называем их стресс-метаморфическими тектонитами. Они образуются в результате пластической деформации — это деформации без разрушения, вероятно, связанные с процессом рекристаллизации.

Как мы отмечали выше, при переходе от стадии катагенеза к метагенезу в связи с повышением температуры происходят необратимые изменения в кварце, появляются признаки деформации при повышении геостатического давления вышележащих пород сначала упругие, затем пластические. Также именно внутренние напряжения в кварцевых зернах, таких как волнистое угасание, блочность, деформационное пластинкование, обусловленные скоплениями дислокаций, являются носителями повышенной свободной энергии исходных кварцевых зерен. Как считал Б.М. Чиков [1988], накопленная энергия расходуется на физико-химические преобразования типа твердофазных реакций, полиморфных превращений и ионных замещений, механическая энергия трансформируется в тепловую и химическую. В конечном счете энергетика стресс-системы является главным фактором перекристаллизации первичного

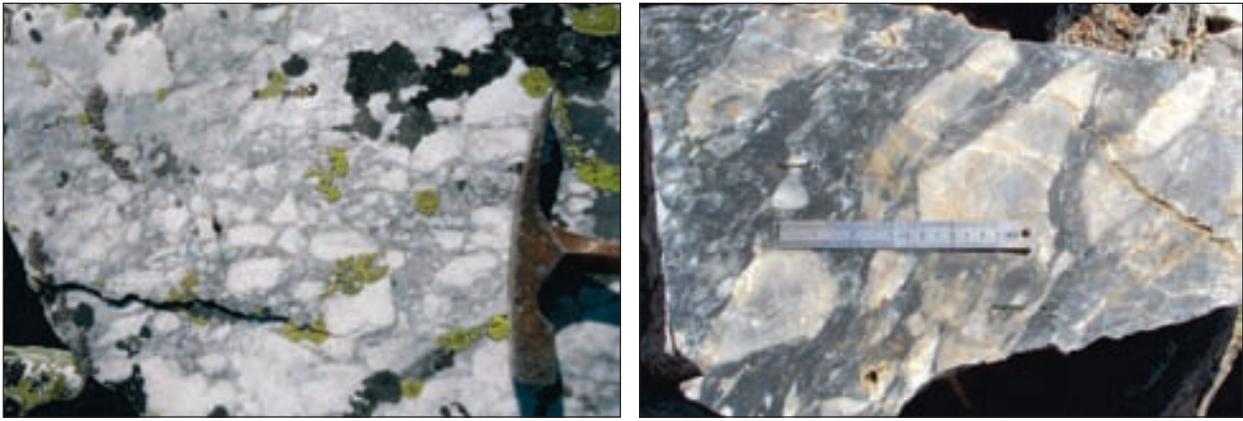


Рис. 10. Стресс-метаморфические тектониты с участками осветления темно-серых графитистых микрокварцитов фрагментами.

Текстура брекчиевидная.

породного субстрата и образования формаций стресс- или динамометаморфического типа — стресс-метаморфических тектонитов. Также Н.С. Ениколопян [1986] считает, что в условиях высоких давлений и деформации сдвига наиболее вероятный механизм массопереноса связан с непрерывным взаимодействием структурных дефектов (вакансий, дислокаций, пустот, электрических разрядов и т.д.) под влиянием деформации сдвига (механическая энергия), приводящих к лавинообразному росту новых дефектов. При стрессе и интенсивных дифференциальных движениях в породах давление на разные участки зерен распределяется неравномерно, происходят явления диффузии вакансий, переползания и частичной аннигиляции дислокаций, выстраивания остающихся дислокаций в наиболее энергетически выгодные конфигурации, в конечном счете, приводящие к снятию внутренних напряжений исходных зерен. И так же, как при стадийных преобразованиях, происходит образование бездефектной гранобластовой структуры. Дальнейшее увеличение температуры приводит к перекристаллизации кварцевых зерен до крупно- и гигантозернистых структур. Таким образом, вероятно, и при пластических деформациях высококремнеземных пород в процессе динамометаморфизма в приповерхностных условиях происходят преобразования серых, темно-серых графитистых микрокварцитов в высококислые разности кварцитов. На рисунке 10 представлены стресс-метаморфические тектониты с брекчиевидной текстурой. Белые фрагменты состоят из осветленных светло-серых белых микрокварцитов, серая, темно-серая вмещающая масса — темно-серые графитистые микрокварциты. Данные образования иллюстрируют промежуточные этапы осветления темно-серых, серых кварцитов, при дальнейшем протекании пластической деформации участки осветления разрастаются до сплошных мономинеральных тел.

Разновидности катаклазитов. Среди катаклазитов встречаются несвязные катаклазиты, представленные разломной брекчией и разломной глиной (глинка трения) (рис. 11), а также связные катаклазиты, представленные тектонической брекчией (рис. 12). В разломных брекчиях более 30 % объема

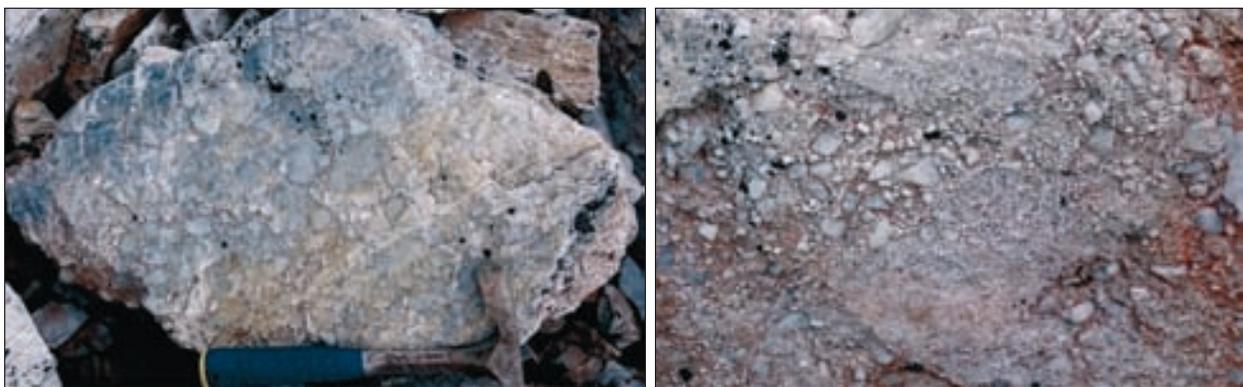
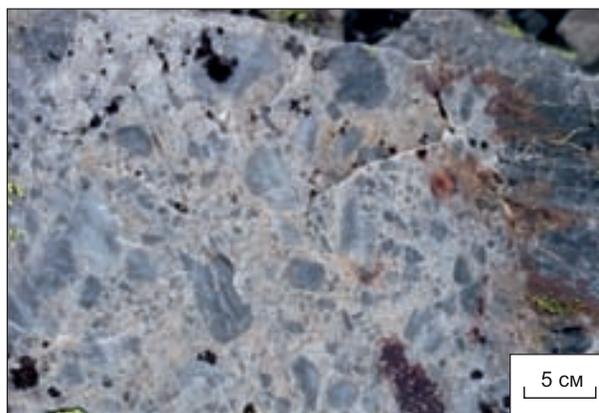


Рис. 11. Несвязные катаклазиты в зоне разлома на Бурал-Сардыкском месторождении.

Слева — разломная брекчия, справа — разломная глина.

Рис. 12. Связные катаклазиты — тектоническая брекчия с фрагментом исходных серых кварцитов справа.

составляют обломки, различимые невооруженным глазом и превосходящие средний размер обломков матрикса, а в разломной глинке (глинка трения) обломки составляют менее 30 %. Обломки брекчии представлены остроугольными неокатанными фрагментами кварцитов. Цементирующая масса состоит из тонкораздробленного кварцевого материала. Размер обломков варьирует от миллиметров до десятков сантиметров. Границы между обломками отчетливые, текстура породы брекчиевая. Тектонические брекчии сложены остроугольными, округлыми щебнистыми обломками из кварцитов, цемент состоит из тонкораздробленного кварцевого материала, который местами замещен гидротермальным кварцем.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные детальные исследования позволили нам построить геологическую карту месторождения, которая отражает состав, формы, размеры, взаимоотношения и последовательность залегания высококислых кварцитов и их вмещающих пород.

Изучение стратификации горных пород показало, что первично-осадочные аркозовые песчаники из базального горизонта и песчаники на карбонатном цементе, а также кремнистые породы (силициты) преобразовались в кварциты. Исходными породами для высококислых кварцитов продуктивного горизонта были кремнистые породы силициты, которые отлагались в виде прослоев среди карбонатных пород и образовывали отдельные слои.

В связи с различной степенью преобразования исходных высококремнеземных пород нами выделен ряд высококислых разновидностей кварцитов: графитистые микрокварциты; осветленные микрокварциты; гранулированные кварциты; «суперкварциты».

Формированию особо чистых разновидностей кварцитов способствовали следующие геологические условия: исходная химическая чистота протолита, постседиментационные преобразования высококремнеземных пород при процессах литогенеза, регионального метаморфизма при наложении динамометаморфизма в связи с тектоническими событиями.

В процессе литогенеза при пластической деформации высококремнеземистой толщи происходила автолизия исходного кварцевого субстрата с выносом примесных компонентов. Присутствие глинистого вещества, флюидных потоков, движущихся по порам, дефектам кристаллов или в виде пленок по поверхности зерен, ускоряло процессы разупорядочения кристаллов и диффузии. Источником флюидов по результатам изотопного анализа кислорода послужили гидротермальные растворы с метаморфической водой (поровой пленочной, капиллярной, конституционной).

В связи с развитием нескольких этапов тектономагматических активизаций периодически возобновлялись условия для разогрева, миграции гидротермальных растворов и механическое разрушение горных пород, тонкое диспергирование минералов. Механоактивация исходных высококремнеземных пород, подвергнутых тектоническим деформациям, также может быть причиной глубокого изменения минерального состава, структуры и текстуры. В связи с этим на месторождении в локальных областях мы наблюдаем тектониты различной природы.

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований ГИН СО РАН (базовый проект IX.129.1.2., № гос. рег. АААА-А16-116122110027-2), ИГХ СО РАН (базовый проект IX.125.3.2., № гос. рег. АААА-А17-117101170035-3).

ЛИТЕРАТУРА

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

Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Милеева И.М. Прогнозно-поисковые модели месторождений особо чистого кварца // Отечественная геология, 2006, № 4, с. 57—63.

Волкова М.Г., Непомнящих А.И., Федоров А.М., Махлянова А.М., Брянский Н.В. Флюидные включения в «суперкварцитах» месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (9), с. 1324—1331.

- Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И.** Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // ДАН, 2003, т. 390, № 2, с. 219—223.
- Григорьев Д.П.** Онтогенез минералов. Львов, Изд-во Львов. ун-та, 1961, 284 с.
- Ениколопян Н.С.** Сверхбыстрые химические реакции в твердых телах // X юбилейный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел: (тезисы). М., 1986, с. 5.
- Кабанова Л.Я., Анфилогов В.Н., Непомнящих А.И., Игуменцева М.А.** Петрография сверхчистых кварцитов участка Бурал-Сарьдак, Восточный Саян // Литосфера, 2014, № 1, с. 81—94.
- Кузьмичев А.Б., Журавлев Д.З., Бибилова Е.В., Кирилова Т.И.** Верхнерифейские (790 млн лет) гранитоиды в Тувино-Монгольском массиве: свидетельство раннебайкальского орогенеза // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (10), с. 1379—1383.
- Летникова Е.Ф.** Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента Палеоазиатского океана // Литосфера, 2005, № 1, с. 70—81.
- Лодочников В.Н.** Петрология Ильчино-Мондинского района // Тр. Вост.-Сиб. геол. управления. Иркутск, 1941, вып. 28, 150 с.
- Макрыгина В.А., Федоров А.М.** Преобразование кварцитов как следствие поздних тектонических событий в развитии Чуйской и Гарганской глыб // Геология и геофизика, 2013, т. 54, (12), с. 1861—1870.
- Мионов А.Г.** Общая геохимия. Улан-Удэ, Изд-во БГУ, 2000, 240 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.Н., Сокольников Ю.В., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю.** Оптическое кварцевое стекло на основе суперкварцитов Восточных Саян // Физика и химия стекла, 2017, т. 43, № 3, с. 288—295.
- Поспелов Г.Л.** Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск, Наука, 1973, 355 с.
- Семейкин И.Н.** Среднерифейская кора выветривания гранитогнейсов Гарганской глыбы и продукты ее переотложения (Восточный Саян) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2009, № 2 (35), с. 126—136.
- Семейкин И.Н., Дольник Т.А., Титоренко Т.Н.** Циклическая стратиграфия и рудоносность рифей-палеозойских отложений Окино-Китойского района (Восточный Саян) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Иркутск, Изд-во ИргТУ, 2006, № 3 (29), с. 84—104.
- Симанович И.М.** Кварц песчаных пород. М., Наука, 1978, 156 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 314).
- Федоров А.М., Спиридонов А.М., Будяк А.Е., Сокольников Ю.В., Куликова З.И.** Условия формирования месторождения сверхчистых кварцитов Бурал-Сарьдак (Восточный Саян) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2011, № 1 (38), с. 94—104.
- Федоров А.М., Макрыгина В.А., Будяк А.Е., Непомнящих А.И.** Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдак (Восточный Саян) // ДАН, 2012, т. 442 (2), с. 244—249.
- Чиков Б.М.** Типы структурно-породных комплексов и принципы геологического картирования линейных зон динамометаморфизма // Геология и геофизика, 1988 (1), с. 18—26.
- Япаскурт О.В.** Предметаморфические изменения осадочных пород в стратиферо: процессы и факторы. М., ГЕОС, 1999, 260 с.
- Япаскурт О.В.** Разделы теории: в двух частях: Часть I: Процессы и факторы эпигенезиса горных пород: диагностика и системный анализ. М., МАКС Пресс, 2013, 216 с.
- Bindeman I.N., Bekker A., Zakharov D.O.** Oxygen isotope perspective on crustal evolution on early Earth: A record of Precambrian shales with emphasis on Paleoproterozoic glaciations and Great Oxygenation Event // Earth Planet. Sci., Lett., 2016, v. 437, p. 101—113.
- Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomnyaschikh A.I., Zhaboedov A.P., Parshin A.V., Sokolnikova Y.V., Posokhov V.F.** Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia // Acta Geochim., 2019, v. 38 (1), p. 22—39.
- McDonough W.F., Sun S.-S.** The composition of the Earth // Chem. Geol., 1995, v. 120, p. 223—253.
- Sharp Z.D., Durakiewicz T., Migaszewski Z.M., Atudorei V.N.** Antiphase hydrogen and oxygen isotope periodicity in chert nodules // Geochim. Cosmochim. Acta, 2002, 66 (16), p. 2865—2873.
- Taylor H.P.** Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks // Earth Planet. Sci. Lett., 1978, v. 38, p. 177—210.