

УДК 553.574(571.54)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОХИМИИ И МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ КВАРЦИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БУРАЛ-САРЬДАГ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

© 2012 г. А. М. Федоров, В. А. Макрыгина, А. Е. Будяк, А. И. Непомнящих

Представлено академиком М.И. Кузьминым 05.07.2011 г.

Поступило 08.08.2011 г.

Месторождения высокочистого кварцевого сырья, столь необходимого для получения высокочистой кварцевой крупки и развития новой солнечной энергетики, в подавляющем большинстве случаев представляют жильные разновидности различного генезиса и, как правило, имеют небольшие запасы. Поэтому особое значение приобретают месторождения кварцитов и кварцитопесчаников, хотя при больших масштабах они часто характеризуются невысокими качественными характеристиками. Одним из весьма редких исключений по низкому содержанию примесей и наибольшим, в связи с этим, перспективам является месторождение Бурал-Сарьдаг с утвержденными запасами “суперкварцитов” для металлургии кремния и производства кварцевой крупки (по категории C_1) 66 тыс. т, микрокварцитов для металлургии кремния (по категории C_1) 497 тыс. т и (по категории C_2) 484 тыс. т [10].

Первые сведения о геологии, геохимии и генезисе кварцитов Восточного Саяна были представлены в работах Е.И. Воробьева с соавторами [3] и Н.Г. Быдтаевой с соавторами [2]. В этих работах авторы предлагают оригинальные модели образования сверхчистых кварцитов в апикальных частях антиклинальных складок в результате термально-флюидного (углекислотно-водного) воздействия гранитоидов сумсунурского комплекса [3] и в сдвиго-надвиговых зонах по дислоцированным кремнистым породам в процессе углекислотного метасоматоза [2]. По нашему мнению, перечисленные гипотезы не находят полного подтверждения, поэтому для разрешения этого вопроса проведено детальное петрографо-геохимическое исследование двух участков кварцитоносного пояса иркутской свиты (г. Бурал-Сарьдаг и оз. Урунгэ-Нур) в местах его пересечения гра-

нитоидами сумсунурского и мункусардыкского комплексов.

Геология. Месторождение Бурал-Сарьдаг расположено в пределах чехла Гарганской глыбы (рис. 1) в восточной части Тувино-Монгольского массива. Оно является частью кварцитоносного пояса иркутской свиты, сложенного сланцево-карбонат-кварцитовыми породами (879 млн лет, K–Ar) [1]. Отложения иркутской свиты широко развиты в северном и северо-западном обрамлении ядра глыбы, занимают нижний стратиграфический ярус ее чехла и перекрываются существенно сланцевыми породами уртагольской свиты. Метаморфизм сланцев и кварцитов иркутской свиты не превышает низов зеленосланцевой фации (300–350°C).

Фундамент Гарганской глыбы архей-нижнепротерозойского возраста представлен гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами и мигматитами (2.3–2.4 млрд лет), степень метаморфизма которых достигает гранулитовой фации. Гарганскую глыбу в целом обрамляют породы верхнерифейских офиолитов преддугового бассейна Дунжугурской островной дуги, представляющие собой фрагменты серпентинизированного и эродированного аллохтона, надвинутого на глыбу. К юго-западу от месторождения Бурал-Сарьдаг породы иркутской свиты прорываются плагиигранитами Гарганского плутона (790 млн лет) [5], относящегося к сумсунурскому комплексу тоналит-трондьемит-дацитового типа.

К югу от Гарганской глыбы получили широкое распространение гранитоиды мункусардыкского комплекса (ранний палеозой) в ассоциации с высокониобиевыми базитами (адакитами) [4]. Геотектоническая позиция и геологическое строение Гарганской глыбы в региональном масштабе и положение на ней месторождения Бурал-Сарьдаг описаны в ряде работ (см., например, [2, 3 и др]).

В пределах выхода пород иркутской свиты наибольшее распространение получили слабометаморфизованные микрокварциты с суммарной истинной мощностью ~600 м [8]. Они являются одной из

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

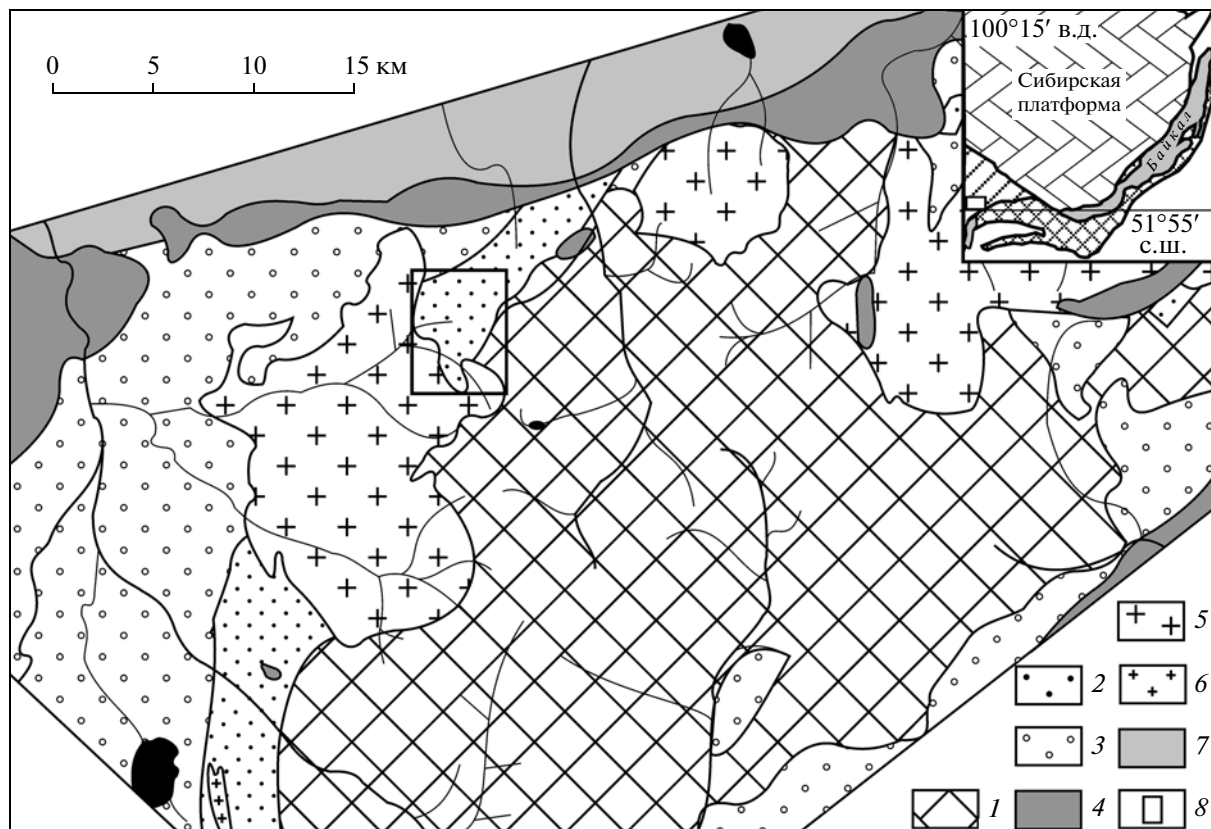


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Тувино-Монгольского массива (по [5] с дополнениями). 1 – фундамент Гарганской глыбы (AR–PR₁); 2, 3 – чехол Гарганской глыбы: 2 – осветленные кварциты иркутской свиты, 3 – иркутская и ургагольская свиты (R₂₋₃); 4 – офиолитовый комплекс (R₃); 5 – гранитоиды сумсунурского комплекса (R₃); 6 – гранитоиды мункусардыкского комплекса (PZ); 7 – чехол Тувино-Монгольского массива (PZ); 8 – участок месторождения Бурал-Сарьдаг. На врезке – положение изучаемого района.

ранних форм литифицированного кремнисто-карбонатного осадка и присутствуют как в продуктивной пачке месторождения Бурал-Сарьдаг, так и в кремнистых доломитах за пределами месторождения, в том числе в районе оз. Урунгэ-Нур, что свидетельствует об их принадлежности к одному стратиграфическому уровню. Авторы рассматривают микрокварциты как исходную породу, по которой развивались остальные разновидности кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг и других проявлений изучаемого района (Урдагарганский, Окинский и другие), и в дальнейшем в этом сообщении они будут именоваться “силицитами” [8]. В “силицитах” основной минеральной примесью являются тонкие прослои известняков и доломитов, которые отмечены и в кварцитах месторождения Бурал-Сарьдаг.

Продуктивные тела белоснежных “суперкварцитов” и светло-серых микрокварцитов на месторождении Бурал-Сарьдаг локализируются на вершине хребта в виде пологозалегающих пластов (7°–10° З–СЗ), тогда как кремнисто-карбонатная толща иркутской свиты имеет крутые углы падения. Наблюдается непрерывный ряд постепен-

но сменяющихся разновидностей от “суперкварцитов”, занимающих верхний этаж, до темно-серых и черных мелко- и микрозернистых кварцитов в низах разреза месторождения Бурал-Сарьдаг.

На месторождении Бурал-Сарьдаг в основании разреза в виде пластовых и линзовидных тел среди доломитовых и известняковых пачек залегают темно-серые и черные углеродсодержащие микрокварциты (от 0.008 × 0.008 до 0.15 × 0.04 мм), со слабовыраженной первичной полосчатостью, обусловленной неравномерным распределением частиц углеродистого вещества. Зерна кварца составляют 97–99% породы, интерстиции между ними заполняют частицы углеродистого вещества (0.5–2%). Серицит и другие более редкие примеси – мусковит, эпидот, гематит – составляют до 0.01–1%. Среди темно-серых микрокварцитов пластовых тел встречаются реликты черных и темно-серых ультрамикрозернистых, почти сливных кварцевых пород (“силицитов”), пигментированных тонкодисперсным углеродистым материалом.

Среди более светлых кварцитов выделяются несколько разновидностей: серые мелкозерни-

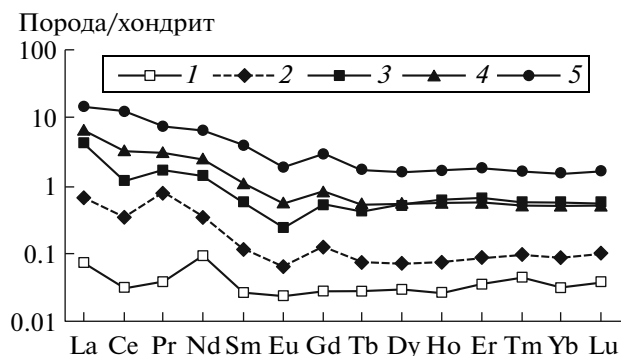


Рис. 2. Относительное содержание РЗЭ в кремнистой пачке иркутской свиты.

1 — “силицит” исходный, (4); 2 — “суперкварцит”, (8); 3 — “силицит” при контактовый, (5); 4 — кварцит светло-серый, (2); 5 — кварцит темно-серый при контактовый, (3). Анализы выполнены в лаборатории Института геохимии СО РАН методом ICP-MS Ю.В. Сокольниковой. В скобках дано количество определений.

стые массивные кварциты, иногда с темно-серыми прослоями и полосчатой текстурой; светло-серые с тонкозернистой структурой (крупность зерен 0.5×0.2 мм); тонкозернистые с пятнисто-полосчатой (от светло-серой до белой) окраской; белые сахаровидные тонкозернистые кварциты с массивной текстурой (величина зерен до 1 мм, структура гранобластовая, мозаичная) и белые кварциты с голубоватым оттенком, содержащие небольшое количество углеродистого вещества.

Непосредственно в пределах месторождения Бурал-Сарьдаг мощность пласта “суперкварцитов”, занимающих верхнее положение в разрезе, оценивается в среднем ~ 8.4 м. “Суперкварциты” характеризуются практически мономинеральным кварцевым составом и грубо неравномерной зернистой структурой. Более крупные зерна с размерами от 1.6×0.5 до 4×2 мм и даже до 9 мм составляют в них от 5 до 50% общей массы. Они характеризуются удлиненной формой, субпараллельно ориентированной по длинной оси, извилистыми, зубчатыми границами и волнистым угасанием. Крупные зерна выделяются на фоне более мелкозернистого кварцевого агрегата, зерна которого по длинной оси также ориентированы одинаково с крупными зернами. Субпараллельная ориентировка порфирированных выделений в “суперкварцитах” свидетельствует об их формировании (перекристаллизации) в условиях длительного одностороннего стресса.

Геохимия. Основной геохимической характеристикой кварцитов иркутской свиты являются низкие суммы элементов-примесей, как в исходных породах (“силицитах”), так и в “суперкварцитах”. Петрогенные элементы в них выступают в качестве примесей, составляя 99% от суммы всех

примесей (табл. 1). Содержание многих редких элементов настолько низко, что их анализ стал возможен только при использовании высокочувствительных методов — ICP-MS и АЭСА. Только с их помощью удалось корректно сравнить особенности распределения элементов по разновидностям кварцитов в разрезах.

“Силициты” наиболее широко распространены вблизи оз. Урунгэ-Нур. По геохимическим признакам они четко подразделяются на две обособленные группы. Первую группу составляют исходные “силициты”, развитые на удалении от гранитов поздней фазы мункусардыкского комплекса, а вторую — развитые поблизости от их выходов (приконтактные).

Исходные “силициты” характеризуются очень низким содержанием примесей, тогда как в приконтактных “силицитах” повышено содержание практически всех породообразующих РЗЭ и редких элементов (рис. 2). Наиболее контрастно это наблюдается для элементов-гранитофилов: Al, Ti, K, РЗЭ и Y, а также Ba, Rb, В, Cs с превышением до 20 раз по сравнению с исходными “силицитами”. Наибольший разброс значений дают Ba и Sr, содержание которых и в мункусардыкских гранитоидах колеблется от 758 до 1620 ppm и от 155 до 918 ppm соответственно [4].

Содержание РЗЭ вблизи зоны контакта по сравнению с “силицитами”, развитыми на удалении, также повышено в десятки раз (рис. 2). Особенно это характерно для легких лантаноидов, отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ изменяется от 1.2 в исходных “силицитах” до 4.4 в приконтактных. Отчетливый Се-минимум, характерный для осадков морских бассейнов, сохраняется практически неизменным, но при приближении к контакту в спектрах РЗЭ явно усиливается Eu-минимум, свидетельствующий о воздействии эндогенного флюида, связанного с гранитоидами мункусардыкского комплекса.

Кварциты месторождения Бурал-Сарьдаг по содержанию петрогенных, РЗЭ и редких элементов также четко можно разделить на две группы.

К первой группе относят черные и темно-серые кремневидные кварциты, отличающиеся низким содержанием породообразующих и редких элементов и сопоставимые по этим элементам как с исходными “силицитами”, так и с осветленными кварцитами и даже “суперкварцитами” Бурал-Сарьдага. Таким образом, черные и темно-серые кремневидные кварциты, осветленные кварциты и “суперкварциты” по сходным геохимическим признакам объединяют под названием “продуктивная толща” или “продуктивные пластовые тела”.

Ко второй группе относят кварциты, пространственно тяготеющие к контакту с тоналитами Гарганского массива, в которых содержание петрогенных и редких элементов выше, чем в чер-

Таблица 1. Среднее содержание элементов-примесей в кварцитах различных типов месторождения Бурал-Сарь-даг (ppm)

Элемент	Порода					
	“Супер кварциты” (ICP-MS, 8)	Светло-серые кварциты (АЭСА, 42)	Черные пластовые кварциты (АЭСА, 10*)	“Силицит” исходный (ICP-MS, 4)	“Силицит” при- контактовый (ICP-MS, 4)	Темно-серые приконтакто- вые кварциты (ICP-MS, 3)
Al	$\frac{9.1-59}{33.05}$	$\frac{9.3-475}{104}$	$\frac{20-257}{72}$	$\frac{19.64-68.25}{40.50}$	$\frac{216-1289}{649}$	$\frac{3488-8773}{5779}$
Ti	$\frac{0.39-23}{4.07}$	$\frac{0.1-252}{15.43}$	$\frac{1.3-113}{14.94}$	$\frac{0.87-1.48}{1.20}$	$\frac{9.5-30}{20.00}$	$\frac{104-612}{342}$
Fe	$\frac{4.8-23}{9.22}$	$\frac{5-887}{92.21}$	$\frac{17-500}{108}$	$\frac{9.89-47.95}{24.60}$	$\frac{15-94}{46.00}$	$\frac{302-876}{596}$
Mn	$\frac{0.02-0.11}{0.05}$	$\frac{0.1-21}{1.10}$	$\frac{0.05-1}{0.57}$	$\frac{0.83-2.72}{1.56}$	$\frac{0.07-4.6}{2.00}$	$\frac{0.72-4.5}{2.35}$
Mg	$\frac{0.5-2.7}{1.73}$	$\frac{3-740}{56.35}$	$\frac{3-170}{44.26}$	$\frac{45.4-505.5}{226.50}$	$\frac{83-1668}{722}$	$\frac{185-278}{239}$
Ca	$\frac{1.5-3.8}{2.47}$	$\frac{5-60}{14.84}$	$\frac{5-20}{8.50}$	$\frac{93.17-1049}{455.07}$	$\frac{3.7-3437}{1374}$	$\frac{24-217}{144}$
Na	$\frac{3.5-7.9}{4.95}$	$\frac{2.8-40}{9.73}$	$\frac{6-25.7}{12.60}$	$\frac{4.02-6.81}{5.02}$	$\frac{6.4-16}{11.00}$	$\frac{60-321}{227}$
K	$\frac{1.4-11}{6.12}$	$\frac{7.3-100}{81.37}$	$\frac{46.6-311}{163}$	$\frac{5.34-15.98}{10.56}$	$\frac{83-452}{243.00}$	$\frac{1228-3090}{2033}$
P	$\frac{0.5-0.9}{0.69}$	$\frac{2-6.7}{3.90}$	$\frac{1-8.6}{4.40}$	$\frac{0.52-0.76}{0.58}$	$\frac{2.4-7.4}{4.00}$	$\frac{17-110}{76.33}$
B	$\frac{0.12-0.26}{0.17}$	$\frac{0.5-7.1}{2.30}$	$\frac{0.5-4}{1.82}$	$\frac{0.04-0.29}{0.16}$	$\frac{0.42-1.7}{1.00}$	$\frac{14.5-28}{20.72}$
Сумма	62.51	381	430	765.75	3072	9459
Li	$\frac{0.4-0.6}{0.50}$	$\frac{0.07-2.3}{0.75}$	$\frac{0.2-1.1}{0.62}$	$\frac{0.25-1.08}{0.61}$	$\frac{0.1-0.9}{0.50}$	$\frac{0.3-2}{1.36}$
Rb	$\frac{0.009-0.056}{0.03}$	—	—	$\frac{0.02-0.1}{0.05}$	$\frac{0.35-1.7}{0.89}$	$\frac{4.8-9.5}{7.07}$
Ba	$\frac{0.22-0.86}{0.61}$	—	—	$\frac{0.43-1.16}{0.67}$	$\frac{5.2-17}{13.47}$	$\frac{29-82}{54}$
Sr	$\frac{0.07-0.33}{0.14}$	—	—	$\frac{0.24-0.87}{0.44}$	$\frac{0.17-5.3}{2.36}$	$\frac{2-6.6}{4.72}$
W	$\frac{0.07-2.1}{0.91}$	—	—	$\frac{0.08-0.3}{0.14}$	$\frac{0.013-0.3}{0.16}$	$\frac{0.26-0.51}{0.37}$
Ni	$\frac{0.1-0.3}{0.13}$	$\frac{0.2-1.2}{0.46}$	$\frac{0.2-0.7}{0.40}$	$\frac{0.05-0.21}{0.10}$	$\frac{0.05-0.17}{0.07}$	$\frac{0.9-1.2}{0.81}$
Cr	$\frac{0.01-0.13}{0.07}$	$\frac{0.5-18}{5.12}$	$\frac{0.5-16}{5.03}$	$\frac{0.12-0.53}{0.27}$	$\frac{0.27-1.4}{0.67}$	$\frac{4.3-15}{9.97}$
V	$\frac{0.011-0.22}{0.14}$	$\frac{0.5-3.2}{0.85}$	$\frac{0.5-4.6}{1.11}$	$\frac{0.09-0.34}{0.23}$	$\frac{0.6-2}{1.29}$	$\frac{25-71}{49}$

Примечание. В числителе – колебание содержания, в знаменателе среднеарифметическое содержание для типов пород. В скобках указано количество проб. Анализы выполнены в лаборатории ИГХ СО РАН методом ICP-MS, аналитик Ю.В. Сокольникова, и АЭСА, аналитик И.Е. Васильева.

* Содержание К и Р дано по пяти пробам.

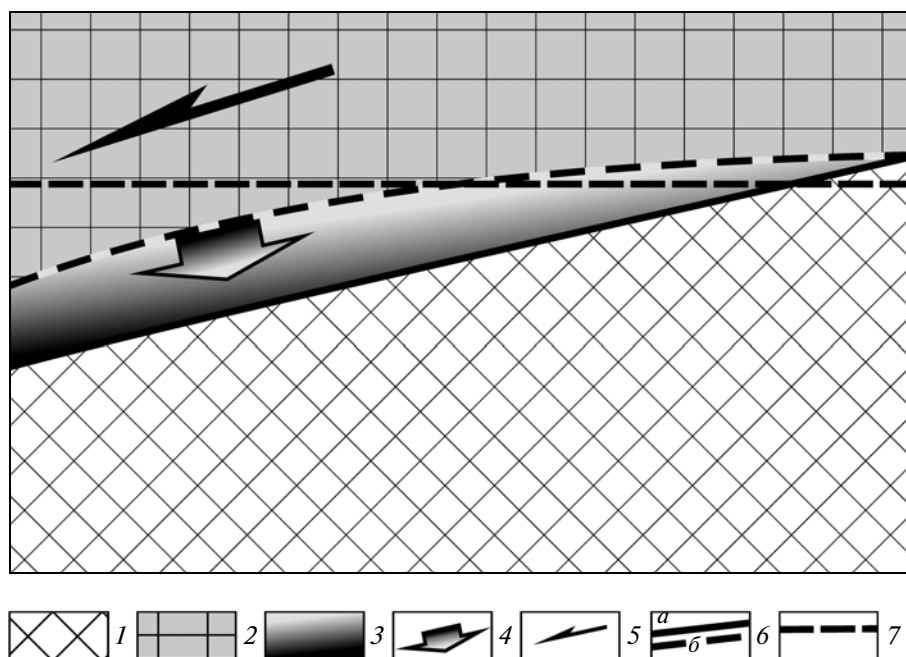


Рис. 3. Схема гравитационного оползания офиолитового покрова с Гарганской глыбы.

1 — фундамент Гарганской глыбы (AR–PR); 2 — офиолитовый комплекс нерасчлененный (R_3); 3 — чехол Гарганской глыбы (иркутская свита, R_{2-3}); 4 — направление и степень воздействия теплового поля от тектонического контакта офиолитов с породами чехла Гарганской глыбы; 5 — направление гравитационного оползания офиолитового комплекса с поверхности Гарганской глыбы; 6 — тектонические нарушения: *a* — достоверные, *b* — предполагаемые; 7 — эрозионный срез.

ных кремневидных кварцитах пластовых тел по Mn, Fe, Ca, Na, K, B и Zr в 10–20 раз, по Ti, Li, Sc, Sr и Ba в 20–30 раз, по Al, V, Rb, Cs превышение составляет примерно 2 порядка. Таким образом, можно констатировать, что внедрение гранитоидов как рифейского, так и палеозойского возраста оказывало негативное влияние (загрязнение) на исходно более чистые кварциты иркутской свиты.

В светло-серых микрокварцитах общее количество примесных компонентов по сравнению с “суперкварцитами” повышено примерно в 5 раз, но оно ниже в 10 раз по сравнению с приконтактовыми кварцитами. Четкой корреляции между интенсивностью осветления и количеством минеральных примесей также не обнаруживается. Это подтверждает, что окраска зависит в первую очередь от количества углистого вещества, которое выносится из кварцитов более интенсивно, чем другие минеральные примеси.

Наиболее “грязными” среди кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг являются темно-серые и черные приконтактовые микрокварциты, в которых содержание элементов-примесей достигает первых процентов и более чем на 2 порядка выше, нежели в “суперкварцитах”. Еще более наглядно увеличивается в приконтактовых кварцитах содержание РЗЭ (ЛРЗЭ — в сотни раз, ТРЗЭ — в десятки), рис. 2. Такое поведение гранитофильных элементов можно объяснить интенсивным воздействием на

осадочную толщу гранитоидов сумсунурского комплекса. В среднем содержание суммы петрогенных элементов в черных приконтактовых кварцитах в 30 раз выше, чем в близких к исходным черным и темно-серых пластовых кварцитах месторождения Бурал-Сарьдаг.

Опираясь на предыдущие исследования [2, 3] и новые геохимические данные, мы предлагаем иную концепцию формирования месторождения высококачественных кварцитов Восточного Саяна. Модель заключается в том, что осветленные кварциты и “суперкварциты” сформировались в ходе динамо-термально-метасоматических преобразований первичных кремнисто-карбонатных пород иркутской свиты (“силицитов”) под воздействием продвигающихся по ним пород офиолитового покрова (рис. 3).

Значительный градиент давлений (стресс-метаморфизм) в подошве надвигающейся или оползающей пластины приводит к мобилизации собственной флюидной составляющей исходных кремнистых пород (“силицитов”) и к ее миграции по разломным и ослабленным зонам в область нижележащих пластов, не подвергшихся стресс-метаморфизму. Судя по парагенезисам минералов, градиент температур был небольшим, не выходящим за пределы зеленосланцевой фации.

В результате этого в верхней части разреза кварцитов при максимальном динамо-термальном

воздействии, вероятно, и происходили автолизия исходного кварцевого субстрата и его перекристаллизация с увеличением размеров и приобретением специфической субпараллельной ориентировки зерен кварца, отражающей направление движения покрова. Участки кремнистой толщи, находящиеся на удалении от тектонического контакта, подверглись меньшему воздействию, вследствие чего они не только испытали меньшую степень перекристаллизации, но и могли стать областью разгрузки для элементов-примесей из вышележащих толщ.

Снижение степени преобразования кварцитов при удалении от плоскости тектонического контакта, сопровождающееся ростом только тех элементов, которые характерны для самих кварцитов, подтверждает воздействие флюидной составляющей из самих пород и отсутствие притока эндогенных флюидов. Осветление же кварцитов в этой области произошло за счет выноса полностью или частично лишь пигментирующего углистого вещества. Только вблизи контакта с гранитами в кварцитах повышается содержание гранитофильных элементов, что не свойственно исходным породам.

Метасоматические преобразования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг происходили, по нашему мнению, в процессе коллапса обдукционного режима в результате всплывания Гарганской глыбы и последовавшего за этим гравитационного оползания пород офиолитового комплекса. Этот тезис подтверждается прежде всего тем, что автолизия и перекристаллизация кварцитов происходили уже после завершения этапа гранитообразования, который, по всей видимости, и привел к воздыманию Гарганской глыбы и гравитационному оползанию с нее осадочных покровов и офиолитовых пластин. Как показано выше, влияние гранитоидов ограничивается загрязнением исходных “силицитов” и всех остальных разновидностей кварцитов гранитофильными элементами. Даже при последующей перекристаллизации и очищении от примесей с образованием “суперкварцитов” в них выражен Eu-минимум, а общее содержание легких лантаноидов повышено. Такое поведение РЗЭ и других элементов говорит о том, что в истории преобразования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг можно выделить этап их заражения примесями, связанный с внедрением сумсунурского интрузивного комплекса, и второй этап, обусловленный оползанием вышележащих толщ, когда происходили очистка и перекристаллизация кварцитов. Это подтверждается тем, что очистка и грануляция кварцев в результате схожих геодинамических обстановок не являются уникальными [6, 9]. Так, в Северном Прибайкалье при воздымании Чуйского поднятия наблюдается тектоническое оползание метаосадочных пород Олоkitского синклинория. В автохтоне обнажаются милонитизированные гнейсы чуйской серии, в составе которой кварцевые ядра

пегматитов и жил претерпевают грануляцию и очистку от примесей, а в подошве аллохтона кварциты авкитской свиты также гранулируются с образованием Тыйского месторождения сверхчистого кварца [6].

В заключение можно отметить, что исходные микрокварциты иркутской свиты (“силициты”) являются достаточно чистыми от примесей; это может служить главной предпосылкой последующего преобразования их в “суперкварциты”. По геохимическим признакам исходные “силициты” могут рассматриваться как перспективные зоны для прироста запасов высокочистого кварцевого сырья при производстве мультикремния и их можно включить в продуктивную пачку.

Воздействие гранитоидов не может быть причиной формирования сверхчистых кварцитов, так как кварциты вблизи контактов гранитоидов как рифейского сумсунурского, так и палеозойского мункусардыкского комплексов загрязняются гранитофильными элементами.

Формирование наиболее чистых “суперкварцитов” продуктивной пачки иркутской свиты (месторождение Бурал-Сарьдаг и другие) происходит в результате гравитационного оползания офиолитовых покровов, приводящего к перекристаллизации и очистке верхнего, прилегающего, горизонта кварцитов с выносом примесей в нижележащие пласты кварцитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонцев Н.А. Гранитоиды Гарганской глыбы. Л.: Наука, 1967. 99 с.
2. Бьдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Яшин В.Н. Кварц. Кремнезем. Материалы Междунар. семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2004. С. 185–187.
3. Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И. // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 219–223.
4. Ефремов С.В. // Геохимия. 2010. № 11. С. 1185–1201.
5. Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: Пробел-2000, 2004. 192 с.
6. Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск: Наука, 1981. 199 с.
7. Петрова З.И., Конева А.А., Макрыгина В.А. // Геохимия. 1995. № 10. С. 1448–1464.
8. Семейкин И.Н. // Изв. Сиб. отд-ния Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. № 2 (35). С. 126–136.
9. Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 182 с.
10. <http://geoconsult.ru/>
11. Evensen N.M., Hamilton P.J., O'Nions R.K. // Geochim. et cosmochimica acta. 1978. V. 42. P. 1199–1212.