

Оригинальная статья / Original article

УДК: 553.57

DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-48-60

## КВАРЦИТЫ КЯХТИНСКОГО СИЛЛИМАНИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ГЕНЕЗИС)

© И.А. Избродин<sup>а</sup>, Г.С. Рипп<sup>б</sup>, Д.Ц. Аюржанаева<sup>с</sup>, В.Ф. Посохов<sup>д</sup>

<sup>а-д</sup>Геологический институт СО РАН,

Российская Федерация, Республика Бурятия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

<sup>б,с</sup>Бурятский государственный университет,

Российская Федерация, Республика Бурятия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а.

**РЕЗЮМЕ.** Цель данной статьи – изучение изотопно-геохимических особенностей кварцитов Кяхтинского силлиманитового месторождения, их генезиса и возможности использования в качестве кварцевого сырья. **Методы.** Изучение кварцитов и вмещающих их пород проведено комплексом методов, включающих геологические, термометрические, геохимические и изотопные (О, Н) исследования. **Результаты.** Установлено, что кварциты, расположенные в телах силлиманитосодержащих пород (участок Крутой, Тракторный-II, Глухая Падь, Лесной) и в гнейсах (Черная Сопка) имеют близкие вещественные характеристики. Для кварцитов отмечается обогащенность титаном (0,8–2,5 мас. % TiO<sub>2</sub>) и повышенные концентрации алюминия (0,2–1,45 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Породы характеризуются дифференцированным спектром распределения редкоземельных элементов. Для оценки источников флюидов, участвовавших в рудообразовании, проведены термометрические исследования, определены изотопные составы кислорода и водорода в минералах. Результаты термометрического изучения газовой-жидкой включений указывают на преобладание водно-углекислотных жидкостей во всех разновидностях кварцитов с незначительной ролью углекислотных магний-кальций-хлоридных флюидов. Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$  ‰ v-SMOW) в кварце (-0,3...-3,5), силлиманите (-1,1), мусковите (-3,2...-3,7), гематите (-4,2...-4,6), рутиле (-6,4...-7,6) и водорода ( $\delta\text{D}$  ‰ v-SMOW) в мусковите (-160,0...-175,3) свидетельствует об участии флюидов с большой ролью вод метеорного источника. Согласно изотопным термометрам, образование кварцитов происходило при температурах 720–600°C. **Выводы.** Отдельные участки кварцитов соответствуют сырью для производства динасовых изделий. Присутствие рутила не затрудняет обогащение традиционными методами кварцевого сырья. Концентрация рутила может быть использован в качестве сырья для получения титана.

**Ключевые слова:** кварциты, Кяхтинская группа силлиманитовых месторождений, изотопный состав кислорода и водорода, метаморфизм.

<sup>а</sup>Избродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории петрологии, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: isbrodin@rambler.ru

Ivan A. Izbrodin, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: isbrodin@rambler.ru

<sup>б</sup>Рипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии Геологического института СО РАН, доцент Бурятского государственного университета, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bsnet.ru

German S. Ripp, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher of the Petrology Laboratory of the Geological Institute SB RAS, Associate Professor of the Buryat State University, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bsnet.ru

<sup>с</sup>Аюржанаева Дулмажап Цыденешиевна, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник лаборатории петрологии Геологического института СО РАН, преподаватель Бурятского государственного университета, тел.: 8 (3012) 419956, e-mail: dulmazhap@mail.ru

Dulmazhap Ts. Ayurzhanava, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Junior Researcher of the Petrology Laboratory of the Geological Institute SB RAS, Senior Lecturer of Buryat State University, tel.: 8 (3012) 419956, e-mail: dulmazhap@mail.ru

<sup>д</sup>Посохов Виктор Федорович, старший научный сотрудник лаборатории физических методов анализа, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru

Viktor F. Posokhov, Senior Researcher of the Laboratory of Physical Methods of Analysis, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru

**Формат цитирования:** Избродин И.А., Рипп Г.С., Аюржанаева Д.Ц., Посохов В.Ф. Кварциты Кяхтинского силлиманитового месторождения (геохимические особенности и генезис) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 48-60. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-48-60

## QUARTZITES OF KYAKHTA SILLIMANITE DEPOSIT (GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS)

I.A. Izbrodin, G.S. Ripp, D.Ts. Ayurzhanava, V.F. Posokhov

Geological Institute SB RAS,  
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Buryat Republic, Russian Federation  
Buryat State University,  
24a Smolin St., Ulan-Ude 670000, Buryat Republic, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **Purpose** of the article is investigation of isotopic and geochemical features of Kyakhta sillimanite deposit quartzites, their genesis and possibilities to be used as a raw quartz material. **Methods.** Quartzites and their enclosing rocks have been examined by the complex of methods including geological, geothermal surveying methods, geochemical and isotopic (O, H) studies. **Results.** It is determined that quartzites located in sillimanite-bearing rocks (Krutoi, Traktovy-II, Glukhaya Pad, Lesnoi sections) and in gneisses (Chernaya Sopka) have similar mineral compositions. The quartzites are enriched with titanium (0.8–2.5 wt.% TiO<sub>2</sub>) and contain high concentrations of aluminum (0.2–1.45 wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). The rocks are characterized with the differentiated REE distribution range. To evaluate the sources of fluids participated in ore formation the thermocriometrical studies were conducted and isotopic abundance of oxygen and hydrogen in minerals was determined. The results of the thermocryometrical investigation of fluid inclusions indicate the predominance of aqueous carbon dioxides in all types of quartzites with the insignificant role of aqueous acids of Ca, Mg chloride fluids. The isotopic composition of oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$  ‰ v-SMOW) in quartz (-0.3...-3.5), sillimanite (-1.1), muscovite (-3.2... -3.7), hematite (-4.2...-4.6), rutile (-6.4...-7.6) and hydrogen ( $\delta\text{D}$  ‰ v-SMOW) in muscovite (-160.0...-175.3) demonstrates the participation of fluids with the contribution of meteoric waters in the formation of quartzites. According to the isotopic thermometers quartzites were formed at the temperatures of 720–600°C. **Conclusions.** Some parts of quartzites correspond to raw materials for the production of silica products. The presence of rutile does not hinder concentration by traditional methods of quartz beneficiation. The rutile concentrate can be used as a raw material for titanium production.

*Keywords:* quartzites, Kyakhta group of sillimanite fields, oxygen and hydrogen isotope compositions, metamorphism

**For citation:** Izbrodin I.A., Ripp G.S., Ayurzhanava D.Ts., Posokhov V.F. Quartzites of Kyakhta sillimanite deposit (geochemical characteristics and genesis). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 2, pp. 48–60. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-48-60

### Введение

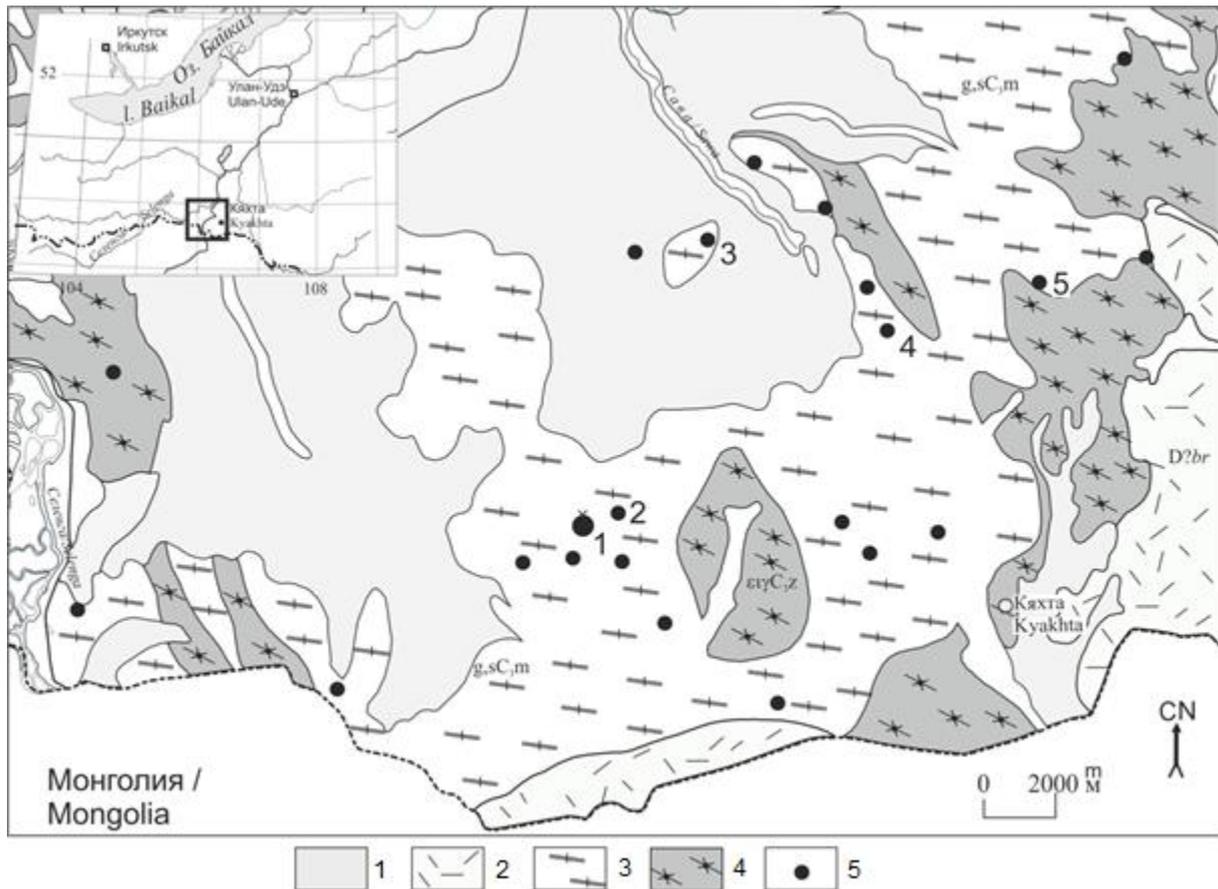
На территории Западного Забайкалья, Прибайкалья и Восточного Саяна установлена большая часть известных геолого-генетических типов месторождений кварца. Часть из них (Чулбонское, Гуджекитское, Атарханское, Урдо-Гарганское и др.) представляют объекты, пригодные для получения чистых кварцевых концентратов. В настоящий момент среди них наиболее изученными являются Бурал-Сарьдагское [1] и Черемшанское кварцитовые месторождения [2], отнесенные к седиментационным

или метаморфогенно-метасоматическим типам.

Не изученными остались более мелкие проявления кварца, отработка которых может происходить попутно с другими полезными компонентами. К их числу относятся кварциты, распространенные в пределах Кяхтинской группы силлиманитовых месторождений. Изучаемый район расположен между городом Кяхта и железнодорожной станцией Наушки в республике Бурятия. Общая площадь, на которой установлены выходы силлиманитовых пород, составляет

около 150 км<sup>2</sup> (рис. 1). Тела кварцитов приурочены к силлиманит-кварцевым и кварц-силлиманитовым породам, реже они образуют прослои и линзы среди гнейсов, гнейсо-гранитов. Наиболее крупные тела отмечены на участках Глухая падь, Трактовый, Южный, Черная сопка, Сава, Наушкинская.

Проведенные исследования содержат информацию для оценки технологических свойств высокоглиноземистых пород и кварцитов Кяхтинского месторождения. Минералогические и геохимические (в том числе изотопные) особенности кварцитов позволяют оценить их генетическую природу.



**Рис. 1. Схема распределения силлиманитсодержащих пород и кварцитов в Юго-Западном Забайкалье (по [3] с упрощениями):**

1 – четвертичные отложения; 2 – туфогенно-осадочные породы, трахибазальты, метатрахидациты, метатрахиродациты и их туфы; 3 – гнейсы и биотитовые, амфибол-биотитовые, кварц-силлиманитовые сланцы, кварциты; 4 – лейкограниты, граниты двуполевошпатовые гнейсовидные биотитовые, реже амфибол-биотитовые, гибридные гранодиориты-граносиениты, мигматиты; 5 – выходы силлиманитовых сланцев и кварцитов. Цифрами обозначены изученные участки: 1 – Крутой, 2 – Черная Сопка, 3 – Глухая падь, 4 – Трактовый-II, 5 – Лесной

**Fig. 1. Distribution scheme of sillimanite-bearing rocks and quartzites in the South-West Transbaikalia (according to [3] with simplifications):**

1 – Quaternary deposits; 2 – tuffaceous-sedimentary rocks, trachybasalts, metatrachydacites, metatrachyriodacites and their tuff; 3 – gneisses and biotite, amphibole-biotite, quartz-sillimanite schists, quartzites; 4 – leucogranites, granites bi-feldspar gneissoid biotite, less often amphibole-biotite, hybrid granodiorites-granosyenites, migmatites; 5 – manifestations of sillimanite schists and quartzites. The digits denote the areas studied: 1 – Krutoi, 2 – Chernaya Sopka, 3 – Glukhaya Pad, 4 – Traktovy-II, 5 – Lesnoi

### Методы исследований

Определение содержаний главных элементов в породах выполнено классическим силикатным и рентгенофлуоресцентным методами (Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ), элементов-примесей – ICP-MS-методом (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 (аналитик Е.А. Хромова).

Для выяснения источников минералообразующих растворов, формировавших рудопроявления, нами был изучен изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta\text{D}$ ) характеризующих отношений  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  и  $\text{D}/\text{H}$  в образце и стандарте SMOW (стандартная среднеокеаническая вода). Изотопные составы кислорода в силикатах и оксидах определены в Геологическом институте СО РАН В.Ф. Посоховым на масс-спектрометре Finigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа силикатных минералов описана в работе [4]. Воспроизводимость анализов составляла  $\pm 0,1\text{--}0,3\%$  при 95%-м доверительном уровне. Анализы водорода в ОН-минералах выполнены по методу, описанному в работе [5], на масс-спектрометре MAT 253 с использованием двойной системы напуска в Аналитическом центре ДВНЦ РАН (г. Владивосток). Для удаления сорбционной воды анализируемые образцы весом 40–100 мг были предварительно прогреты в вакууме при 200°C. Измерения выполнены относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международному стандарту NBS-30. Результаты измерений нормализованы по международным стандартам VSMOW, SLAP, GISP, воспроизводимость анализов  $\delta\text{D}$  ( $1\sigma$ ) образцов составляла 1,5%. Расчет состава кислорода в

воде, равновесной с минералами, проведен по методике, проанализированной в источнике [6]. Температуры, использованные для оценки изотопных составов, взяты из результатов термометрических исследований, минеральных и изотопных геотермометров.

### Геологическое строение площади

Силлиманитовые сланцы и кварциты установлены в пределах гнейсового комплекса (см. рис. 1). В составе комплекса преобладают биотитовые, биотит-амфиболовые гнейсы, реже встречаются амфиболиты, гранат-биотитовые и силлиманит-биотитовые сланцы. К югу и юго-востоку от данной площади метаморфические породы сменяются слабоизмененными вулкано-осадочными породами кислого и среднего состава.

На основании высокого уровня метаморфизма (преобразования до амфиболитовой, участками гранулитовой фации) возраст был оценен как дорифейский или раннедокембрийский (Гусев, Хаин, 1993) [7]. Предполагается также, что сланцы и гнейсы являются продуктами прогрессивного метаморфизма допермских вулканогенных пород в процессе становления Заганского гранито-гнейсового купола [8]. На основании Rb-Sr радиологических датировок (270–290 млн лет) вулканы, гнейсы и сопряженные с ними граниты были объединены в позднепалеозойский метаморфогенно-магматический комплекс. Геохронологические данные для пород Заганского хребта [9] свидетельствуют о мезозойском возрасте метаморфизма, связанном с формированием метаморфических ядер. U-Pb (SHRIMP II) и Rb-Sr геохронологическими данными для метаморфических пород установлено, что они были сформированы в два этапа: 282–280 и 138–130 млн лет, а модельные Sm-Nd значения не выходят за пределы рифея – нижнего протерозоя, отражают нижний предел возраста пород, за счет которых сформировался субстрат [10].

### Минералого-петрографическая характеристика пород

Тела кварцитов распространены в силлиманитсодержащих породах (участки Крутой, Трактовый-II, Глухая Падь, Лесной) и в гнейсах (Черная Сопка). Как правило, выходы кварцитов хорошо выражены в рельефе и образуют скальные выходы либо представлены крупноглыбовыми развалами, устойчивыми к выветриванию. На участке Крутой прослежен постепенный переход от сливных кварцитов к силлиманитсодержащим и затем к кварц-мусковит-силлиманитовым сланцам. При этом происходит изменение цветового фона кварца и появление жильной генерации. Вмещающие силлиманит-кварцевые сланцы с переменными содержаниями слюд характеризуются тонкополосчатой текстурой, обусловленной чередованием слойков, обогащенных силлиманитом и кварцем. В них также отчетливо выражена сланцеватая текстура, которая проявляется в параллельной ориентировке зерен силлиманита и кварца. Структура их меняется от фиброгранобластовой до фибробластовой, нередко она сноповидная, метельчато-лучистая или волокнистая. Средний состав пород: кварц – 50–80%, силлиманит – 15–50%, мусковит – до 5%, рутил – 1–3%. Акцессорные минералы представлены магнетитом, лазулитом и сульфат-апатитом. В составе силлиманитсодержащих пород установлено более 30 минеральных видов, большая часть которых относится к группе алюмофосфатов и сульфат-фосфатов [11].

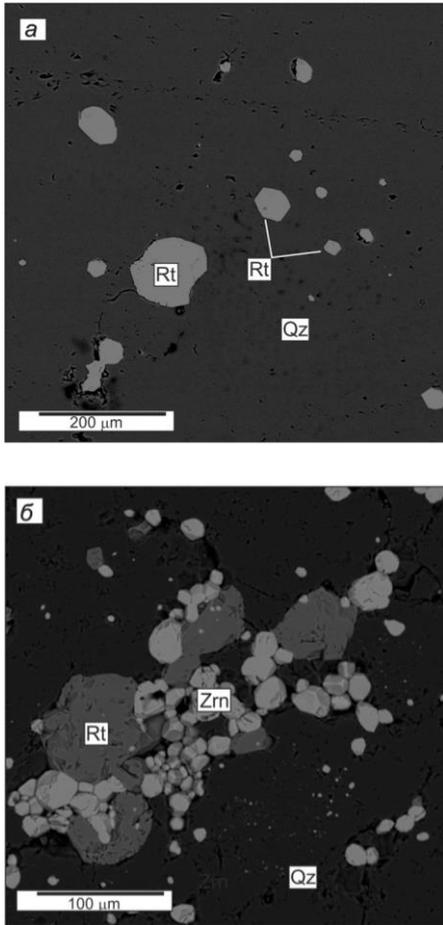
Кварциты Кяхтинской группы на 96–98% состоят из различных по величине (от 0,3 до 1,0 см) слабдеформированных зерен кварца. Типоморфными акцессорными минералами являются рутил, реже мусковит и циркон. В большей части кварциты имеют светло-серый, серый цвет, на некоторых участках наблюдаются желтые, бурые, красновато-бурые тона окраски. В породах не наблюдается

признаков замещения кварцем ранее существовавших минералов, отсутствуют реликты первичных пород, что указывает на первично осадочную природу кварцитов.

В кварцитах, ассоциирующих с силлиманитовыми сланцами, отмечаются повышенные содержания мусковита (до 3%), силлиманита (до 5%), рутила (1–2%). В незначительных количествах в них присутствуют титаногематит, пирит, магнетит, лазурит. В пустотах и по трещинам кварца обнаруживаются вторичные и гипергенные минералы (барит, минералы вудхаузеит-сванбергитового ряда, высоководные фосфаты и др.). Среди текстур преобладает массивная, реже встречается пятнистая, неясно сланцеватая. Макроскопически породы характеризуются равномернoзернoй и гранобластовой структурой. Характерной особенностью кварцитов является обогащенность рутилом. Последний встречен на всех участках, образуя неравномерные по величине идиоморфные зерна и кристаллы короткопризматической формы размерами от 0,02 до 0,4 мм (рис. 2). Иногда отмечаются более поздние полосовидные сегрегации неправильной формы, сложенные кварцем, рутилом и цирконом (см. рис. 2, б). Мощность таких выделений не превышает 5–10 см. В рутиле присутствуют до 1 мас. % железа и первых десятых долей процента ванадия. В некоторых зернах обнаружены тонкие пластинки гематита.

Циркон обычно представлен единичными зернами округлой формы со слабовыраженной огранкой, имеющими размер от 0,03 до 0,10 мм. Реже встречаются его небольшие скопления (см. рис. 2, б). В числе примесей в нем присутствует скандий (до 0,8 мас. %) и гафний (до 1,5 мас. %).

Пластинки мусковита в кварцитах встречается спорадически. Особенностью его являются варьирующие содержание парагонитового и фенгитового



**Рис. 2. Вкрапленность рутила (Rt) и сегрегация циркона (Zrn) в кварцитах участка Глухая Падь (обр. гл.п.3) и Трактовый (обр. Тр2/4)**  
Qz – кварц.

Фото в обратнорассеянных электронах  
**Fig. 2. Rutile (Rt) impregnation and zircon (Zrn) segregation in quartzites of the Glukhaya Pad section (sample Gl.P.3) and Traktovy (sample Tr2/4)**  
Qz – quartz.  
Backscattered electron image

миналов, отсутствие фтора. В отдельных анализах мусковитов наблюдается дефицит глинозема в октаэдрической позиции, компенсированный трехвалентным железом. В минерале до 1 мас. % присутствует титан и барий.

#### Геохимическая характеристика

Для кварцитов при среднем содержании  $\text{SiO}_2 \sim 96$  мас. % отмечаются обо-

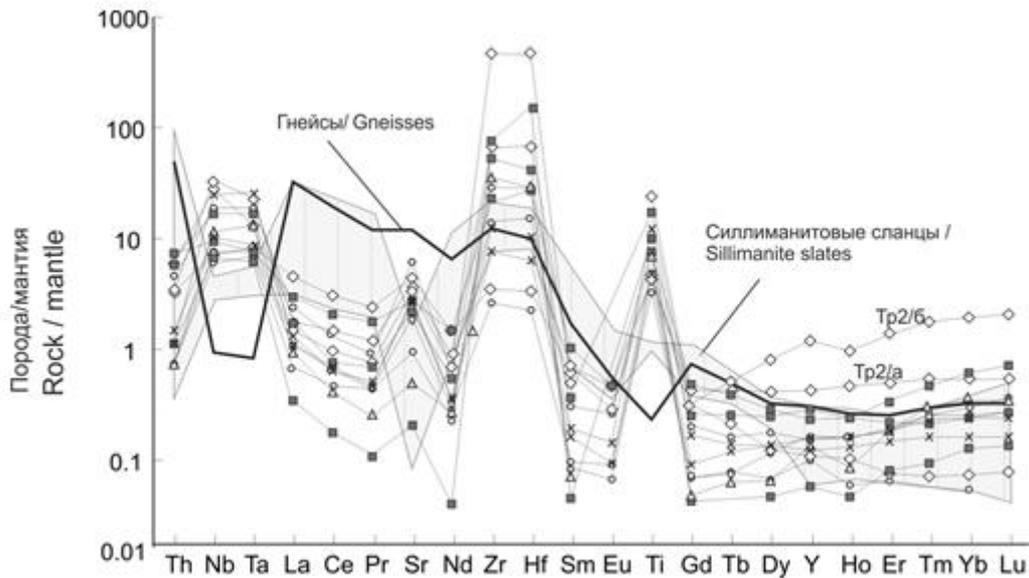
гащенность  $\text{TiO}_2$  (таблица), повышенные концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Содержание легких лантаноидов в кварцитах варьирует от 0,66 до 12 ppm, увеличиваясь в силлиманитсодержащих кварцитах до 75 ppm, и достигает максимума в силлиманитовых сланцах (134–655 ppm). Концентрация тяжелых лантаноидов в породах остается примерно на одном уровне, не превышая 1 ppm (см. таблицу). Графики распределения редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в кварцитах и вмещающих их силлиманитовых сланцах и гнейсах представлены на рис. 3. Они указывают на некоторое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми ( $\text{La}_N / \text{Yb}_N = 0,7\text{--}12$ ), в связи с чем тренды распределения нормированных к хондриту содержаний РЗЭ имеют небольшой наклон от легких РЗЭ к тяжелым (см. рис. 3, б). Кривые распределения тяжелых РЗЭ – пологие ( $\text{Gd}_N / \text{Yb}_N = 0,27\text{--}1,96$ ), отрицательная аномалия Eu отсутствует. Кварциты характеризуются дифференцированным распределением «неподвижных» в процессах метаморфизма элементов-примесей с отчетливыми положительными аномалиями Nb, Ta, ( $\text{La} / \text{Nb} = 0,05\text{--}0,14$ ), Sr, Pb, Zr, Hf и Ti (см. рис. 3, а). Для силлиманитовых сланцев характерно обогащение группой легкими РЗЭ ( $\text{La}_N = 164\text{--}21$ ,  $\text{La}_N / \text{Yb}_N = 179\text{--}31$ ) относительно тяжелых, что выражается крутым наклоном кривой (см. рис. 3, б). Помимо этого, сланцы отличаются отрицательной аномалией Sr, слабо выраженной аномалией или отсутствием аномалии Eu ( $\text{Eu} / \text{Eu}^* = 0,94\text{--}0,61$ ) и разнонаправленным поведением Th. Относительно сланцев гнейсы обладают менее дифференцированным распределением РЗЭ ( $\text{La}_N / \text{Yb}_N = 69\text{--}11$ ). Для них характерно обеднение тяжелыми РЗЭ ( $\text{La}_N / \text{Sm}_N = 2,7\text{--}10,4$ ,  $\text{Gd}_N / \text{Yb}_N = 1,7\text{--}6,4$ ), наличие отрицательной аномалии Eu ( $\text{Eu} / \text{Eu}^* = 0,73\text{--}0,4$ ) и отчетливых аномалий Nb, Ta и Ti. В остальных элементах обнаруживают сходство (см. рис. 3).

Химический состав кварцитов Кяхтинского силлиманитового месторождения  
The chemical composition of quartzites of the Kyakhtinskoe sillimanite deposit

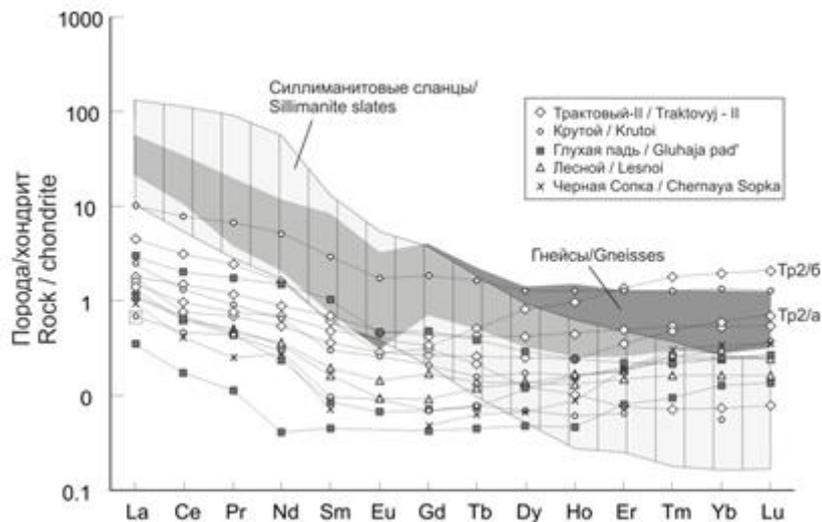
Элемент / Element	Участок / Section											
	Глухая падь / Glukhaya Pad			Трактовый-II / Traktovyy-II			Крутой / Krutoi			Лесной / Lesnoi	Черная Сопка / Chernaya Sopka	
	Проба / Sample											
	Гл п1/1	Гл п2	Гл п3	Тр2/4б	Тр2/4а	Тр2/7	Кр-8	Кр-13	Кр-18	Кр-15в	Л-22	Чс-20б
SiO <sub>2</sub>	96,70	96,00	92,70	93,50	95,77	96,90	97,60	97,50	97,00	94,80	97,50	97,40
TiO <sub>2</sub>	2,18	1,66	3,72	5,17	2,37	1,01	0,71	0,96	0,85	1,56	1,49	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,60	0,40	0,80	1,45	0,40	0,60	0,50	0,90	2,00	0,40	0,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,69	2,16	<0,1	0,14	0,34	0,12	0,17	0,15	0,17	0,18	0,29
FeO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MgO	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,10	<0,01
CaO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	<0,1	<0,1
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,15	0,03	0,04
K <sub>2</sub> O	<0,01	0,13	0,02	0,02	0,04	0,12	0,02	0,09	0,10	0,44	0,06	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,16	<0,1	<0,1
ППП / II	0,20	0,32	0,50	0,32	0,30	0,48	0,24	0,24	0,32	0,38	0,22	0,12
Сумма / Total	99,44	99,45	99,52	99,83	100,09	99,38	99,32	99,47	99,35	99,87	99,98	99,32
Mg	64,32	149,82	132,48	98,68	89,24	118,90	58,42	85,93	158,37	167,74	<50	63,37
P	118	218	181	155	211	244	79	59	58	651	178	84
Ca	423	613	761	533	146	1200	547	368	980	1477	380	494
Sc	2,60	2,41	4,84	19,39	3,09	0,78	0,46	4,07	2,82	3,68	1,77	1,37
V	7,36	16,01	20,71	28,20	9,95	7,59	10,00	35,63	26,72	47,38	7,46	6,64
Cr	10,70	7,01	16,45	20,82	10,13	9,44	9,87	22,15	10,05	3,99	16,17	18,21
Mn	2,23	6,36	7,94	5,61	6,21	1,72	3,49	14,23	5,38	8,76	7,19	14,00
Co	0,18	0,54	1,91	0,42	0,18	0,36	0,36	0,42	1,05	0,96	0,42	0,42
Ni	7,22	17,95	11,51	10,31	5,47	6,47	8,42	7,00	11,63	3,17	5,53	8,55
Cu	29,10	29,25	54,73	23,19	11,73	18,76	12,37	14,91	19,66	17,84	21,60	13,48
Zn	26,88	52,04	85,07	44,96	<5	37,18	41,27	30,85	52,71	13,34	0,72	38,68
Rb	1,15	4,62	3,35	2,04	0,92	2,49	2,39	2,88	4,50	6,54	0,92	2,43
Sr	4	57	46	72	79	93	41	20	11	130	10	55
Y	0,26	1,05	1,32	5,38	1,97	0,49	0,46	0,75	6,02	0,69	0,62	0,56
Zr	850	237	597	5258	735	30	29	324	225	161	402	86
Nb	4,87	6,76	11,84	19,95	23,87	5,08	4,29	5,39	7,17	13,29	8,23	7,45
Mo	2,28	2,04	8,35	7,09	3,14	1,01	0,79	1,34	0,49	1,55	1,21	0,97
Sn	6,53	2,79	5,45	13,94	4,27	1,85	0,54	1,12	2,28	2,54	2,40	0,92
Cs	<0,1	0,18	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,25	0,18	0,11	<0,1	<0,1
Ba	395	437	4635	711	727	293	21	62	32	61	367	35
La	0,24	2,04	1,18	1,02	1,24	3,14	0,48	0,76	6,89	1,67	0,65	0,90
Ce	0,31	3,62	1,34	1,70	2,61	5,50	0,83	1,17	13,80	2,33	0,74	1,11
Pr	0,03	0,48	0,19	0,21	0,33	0,67	0,12	0,12	1,88	0,25	0,07	0,14
Nd	0,06	1,99	0,73	0,93	1,20	2,17	0,39	0,32	7,17	0,88	0,37	0,46
Sm	0,02	0,46	0,16	0,22	0,31	0,27	0,04	0,04	1,29	0,14	0,03	0,07
Eu	н.о. / bdl	0,08	н.о. / bdl	н.о. / bdl	0,08	0,05	0,02	0,01	0,29	0,04	н.о. / bdl	0,02
Gd	0,03	0,28	0,16	0,20	0,26	0,19	0,04	0,04	1,09	0,13	0,03	0,06
Tb	<0,005	0,04	0,03	0,06	0,05	0,02	0,01	0,01	0,18	0,02	0,01	0,01
Dy	0,03	0,22	0,18	0,59	0,31	0,09	0,05	0,08	0,94	0,13	0,05	0,10
Ho	0,01	0,04	0,04	0,16	0,08	0,02	0,01	0,03	0,21	0,03	0,01	0,02
Er	0,04	0,11	0,17	0,65	0,24	0,04	0,03	0,09	0,61	0,09	0,09	0,07
Tm	0,01	0,02	0,04	0,13	0,04	0,01	<0,005	0,02	0,09	0,02	0,02	0,01
Yb	0,06	0,12	0,30	0,96	0,26	0,04	0,03	0,12	0,66	0,15	0,17	0,08
Lu	0,01	0,02	0,05	0,15	0,04	0,01	<0,005	0,02	0,10	0,03	0,03	0,01
Hf	48,30	8,34	12,90	141,05	21,52	1,05	0,70	8,89	6,51	4,72	8,92	1,93
Ta	0,26	0,31	0,68	0,54	0,96	0,34	0,28	0,31	0,48	0,77	0,54	0,37
Pb	5,97	24,89	15,45	11,30	9,27	33,38	8,19	9,43	8,88	7,73	2,54	10,19
Th	0,09	0,60	0,51	0,48	0,27	0,27	0,06	0,06	0,15	0,36	0,06	0,12
U	1,16	2,92	3,89	2,81	0,69	0,54	0,06	0,80	1,43	0,90	0,78	0,21

Примечание. ППП – потеря при прокаливании. Н.о. – ниже предела обнаружения. Оксиды даны в мас. %, элементы – в ppm.

Note. ППП – ignition losses (il). B.d. – below detection limit (bdl). Oxides are given in the wt.%, elements – in trace.



а



б

Рис. 3. Распределение редких и редкоземельных элементов в кварцитах и вмещающих породах (использованы данные из табл. 1 и неопубликованные данные)

Светло-серое поле со штриховкой – кварц-мусковит-силлиманитовые сланцы, темно-серое поле – биотит-амфиболовые, двуслюдяные гнейсы

Fig. 3. Distribution of rare and rare-earth elements in quartzites and enclosing rocks (Data from Table 1 and unpublished data are used)

Light grey hatched area – quartz-muscovite-sillimanite schists, dark grey area – biotite-amphibole, two-mica gneisses

### Состав стабильных изотопов

В минералах из кварцитов участков Крутой, Трактовий-II, Черная сопка установлены отрицательные значения  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 4) и низкие величины  $\delta\text{D}$ . Среди кварца выделено две генерации. Первая, слагающая основную массу пород,

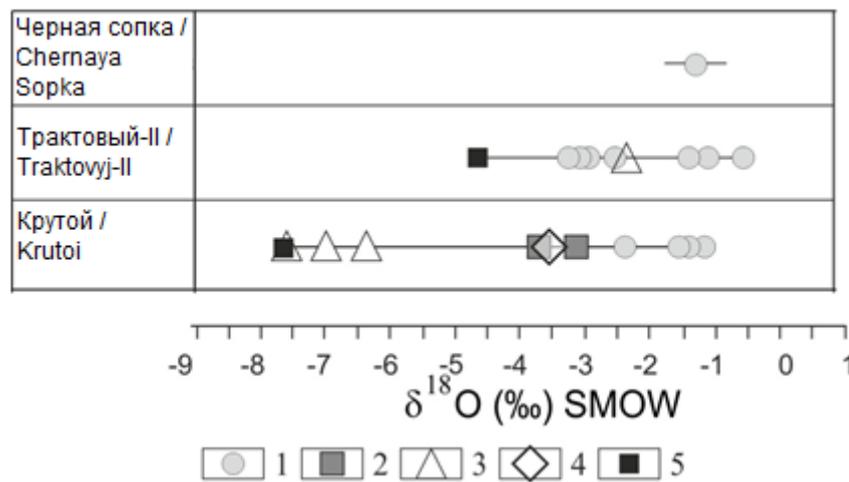
характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$  от -0,6 до -3,0. Вторая генерация имеет признаки вторичного происхождения, образует маломощные (от нескольких миллиметров до 5–7 см) выделения и прожилки, характеризуется значениями (-2,5...-3,1  $\delta^{18}\text{O}$ ). Расчетная величина  $\delta^{18}\text{O}$  воды в парах

минерал – вода варьирует от -4 до -12,15%. Существенно метеорный источник воды отмечен также в кварцитах Охотско-Чукотский вулканогенного пояса [12]. Изотопные составы  $\delta D$ , определенные в мусковите из силлиманитсодержащего и «чистого» кварцитов, также характеризуются высокой деплетированностью дейтерием (-160,0...-175,3%). Полученные значения  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  близки к высокоглиноземистым породам и гнейсам этого района [13]. Резко отличаются от них изотопные составы кислорода кварцитов Восточного Саяна (26,5...29,8  $\delta^{18}O$  [14]) и Черемшанского месторождения (13...16  $\delta^{18}O$ ).

**P-T-параметры и условия формирования кварцитов**

Гнейсы участка Черная сопка по данным минеральных геотермометров формировались при температуре 640–690°C и давлении 5,2–6,8 кбар [10]. При этом в силлиманитовых сланцах фиксируются свидетельства регрессивного метаморфизма. Логично предположить, что кварциты претерпели изменения в пределах этих значений. Температуры, вычисленные для кварцитов по

распределению изотопов кислорода в парах кварц – минерал (согласно [6, 15, 16]), составили 720–600°C. В условиях, близких к 660–720°C, поддерживалось локальное изотопное равновесие между кварцем – рутилом и кварцем – мусковитом. При более высоких температурах (в интервале образования силлиманита) зафиксирована неравновесность изотопной системы, которая была открытой для обмена кислорода при более поздних регрессивных процессах. Причиной неравновесности изотопной системы между кварцем и силлиманитом мог быть захват кислорода из вмещающих пород. Проведенные термокриометрические исследования газовой-жидких включений указывают на преобладание водно-углекислотных жидкостей во всех разновидностях кварцитов [17] с незначительной ролью углекислотных магний-кальций хлоридных флюидов. Температуры гомогенизации таких включений составили 250–338°C, и они резко контрастируют с температурами, полученными по изотопным термометрам. Одним из объяснений этого может быть проработка кварцитов растворами на регрессивной стадии.



**Рис. 4. Изотопный состав кислорода  $\delta^{18}O$  (‰, SMOW) в минералах из кварцитов Кяхтинского месторождения:**

1 – кварц; 2 – мусковит; 3 – рутил; 4 – силлиманит; 5 – гематит

**Fig. 4. Isotopic composition of oxygen  $\delta^{18}O$  (‰, SMOW)**

**in minerals from Kyakhta deposit quartzites:**

1 – quartz; 2 – muscovite; 3 – rutile; 4 – sillimanite; 5 – hematite

### Заключение

Результаты вещественного и изотопно-геохимического изучения кварцитов Кяхтинской группы силлиманитовых месторождений позволяют сделать следующие выводы. Отдельные участки кварцитов соответствуют сырью для производства диоксидных изделий. Повышенные концентрации титана и алюминия, связанные с минеральными формами (рутилом и каолинитом), не будут осложнять обогащения кварцевого сырья при

традиционных методах. Полученный при этом концентрат рутила может быть использован в качестве сырья для получения титана. Изотопные составы кислорода и водорода свидетельствуют об участии в образовании кварцитов флюидов с высокой ролью вод метеорного источника.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-35-00365 мол\_а.*

### Библиографический список

1. 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 [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.014> (дата обращения: 01.06.2016).
2. Семейкин И.Н., Аюржанаева Д.Ц. Кварциты Черемшанского месторождения – продукт переотложенной коры химического выветривания пород // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6 (49). С. 57–67.
3. Кошкин В.В. Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения. Издание второе. Серия Селенгинская. Лист М-48-ХVIII (Бичура). СПб., Изд-во ВГБ ВСЕГЕИ, 2003.
4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1990. Vol. 54. Pp. 1353–1357 [Электронный ресурс]. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M) (дата обращения: 23.10.2012).
5. Vennemann T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent // Chemical Geology. 1993. Vol. 103. Pp. 227–234.
6. Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. Pp. 2299–2307 [Электронный ресурс]. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90105-E](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(91)90105-E) (дата обращения: 18.10.2012).
7. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношении Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. № 5. С. 68–82.
8. Комаров Ю.В., Копылов Э.Н., Белоголовкин А.А. Байкальский мегасвод (структура, магматизм, металлогения). Новосибирск: Наука, 1984. 121 с.
9. Склярков Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 229 с.
10. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Sergeev S.A., Matukov D.I., Posokhov V.F. The age of metamorphism of sillimanite-bearing schists at the Kyakh-tinskoe deposit (southwestern Transbaikalia) // Russian Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51. Pp. 274–277 [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.015> (дата обращения: 15.01.2010).

11. Избродин И.А., Рипп Г.С., Карманов Н.С. Фосфатная и сульфат-фосфатная минерализация силлиманитсодержащих пород Кяхтинского месторождения (Западное Забайкалье) // Записки Российского минералогического общества. 2008. № 3. С. 94–106. DOI: 10.1134/S1075701509070101.

12. Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулкано-генный пояс) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 4. С. 32–48.

13. Избродин И.А., Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Посохов В.Ф. Изотопный состав кислорода и водорода в метаморфизованных высокоглиноземистых породах Юго-Западного Забайкалья // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459. № 3. С. 352–356. DOI: 10.1134/S1028334X1411021X.

14. Федоров А.М., Макрыгина В.А., Непомнящих А.И., Посохов В.Ф. Изотопно-геохимические исследования кварцитов Восточного Саяна // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-

Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы конф. 2016. № 14. С. 280–282.

15. Chacko T., Hu X.S., Mayeda T.K., Clayton R.N., Goldsmith J.R. Oxygen isotope fractionations in muscovite, phlogopite and rutile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. Vol. 60. Pp. 25957–2608 [Электронный ресурс]. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(96)00112-3) (дата обращения: 18.10.2011).

16. Zheng Y-F., Simon K. Oxygen isotope fractionation in hematite and magnetite: a theoretical calculation and application to geothermometry of metamorphic iron formation // *European Journal of Mineralogy*. 1991. Vol. 3. Pp. 877–886. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0877.

17. Аюржанаева Д.Ц., Избродин И.А., Дамдинова Л.Б. Условия формирования кварцитов Кяхтинской группы месторождений по результатам термометрических исследований: материалы XVII Всерос. конф. по термобарогеохимии. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. С. 17–19.

## References

1. Makrygina V.A., Fedorov A.M. Quartzite transformation as a consequence of late tectonic events in the evolution of the Chuya and Gargan blocks. *Geologiya i Geofizika* [Geology and Geophysics], 2013, vol. 54, no. 12, pp. 1861–1870. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.014> (accessed 01 June 2016). (In Russian).

2. Semeikin I.N., Aiurzhanava D.Ts. Chermshanka silica deposit quartzites as re-sedimentation products of chemical weathering of rocks. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology,

Prospecting and Exploration of Mineral Deposits], 2014, vol. 49, no. 6, pp. 57–67. (In Russian).

3. Koshkin V.V. *Karta poleznykh iskopaemykh i zakonornostei ikh razmeshcheniia, izdanie vtoroie. Seriiia Selenginskaia. List: M-48-XVIII (Bichura)* [Map of mineral resources and their distribution regularities, second edition. Selenga Series. Sheet: M-48-XVIII (Bichura)]. St. Petersburg: All-Russian geological library of the Russian research geological Institute of A.P. Karpinsky Publ., 2003.

4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357. Available at:

[http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M) (accessed: 23 October 2012).

5. Vennemann T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. *Chemical Geology*, 1993, vol. 103, pp. 227–234.

6. Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, vol. 55, pp. 2299–2307. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90105-E](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(91)90105-E) (accessed: 18 October 2012).

7. Gusev G.S., Khain V.E. On the correlation of the Baikal-Vitim, Aldan-Stanovoi and Mongolo-Okhotsk terranes (south of Central Siberia). *Geotektonika* [Geotectonics], 1995, no. 5, pp. 68–82. (In Russian).

8. Komarov Iu.V., Kopylov E.N., Belogolovkin A.A. *Baikal'skii megasvod (struktura, magmatizm, metallogeniia)* [Baikal megaarch (structure, magmatism, metallogeny)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 121 p.

9. Skliarov E.V., Mazukabzov A.M., Mel'nikov A.I. *Kompleksy metamorficheskikh iader kordil'erskogo tipa* [Complexes of metamorphic nuclei of the Cordiller type]. Novosibirsk: Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1997, 229 p.

10. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Sergeev S.A., Matukov D.I., Posokhov V.F. The age of metamorphism of sillimanite-bearing schists at the Kyakhtinskoe deposit (southwestern Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, pp. 274–277. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.015> (accessed: 15 January 2010).

11. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Karmabov N.S. Phosphate and sulfate-phosphate mineralization in sillimanite-bearing rocks at the Kyakhta deposit (Western Transbaikalia region). *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society], 2008, no. 3, pp. 94–106. DOI: 10.1134/S1075701509070101.

(In Russian).

12. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relations to gold mineralization at the Svetloe Deposit (Ul'ya Trough, Okhotsk-Chukotka volcanic belt). *Tikhookeanskaia geologiya* [Pacific Geology], 2011, vol. 30, no. 4, pp. 32–48. (In Russian).

13. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Posokhov V.F. Oxygen and hydrogen isotope compositions of metamorphosed high-aluminous rocks of Southwestern Transbaikalia. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2014, vol. 459, no. 3, pp. 352–356. DOI: 10.1134/S1028334X1411021X. (In Russian).

14. Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomniashchikh A.I., Posokhov V.F. *Izotopno-geokhimicheskie issledovaniia kvartsitov Vostochnogo Saiana* [Isotope-geochemical investigations of Eastern Sayan quartzites]. *Geodinamicheskaya evoliutsiia litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poiasa (ot okeana k kontinentu): materialy konferencii* [Geodynamic Evolution of Central Asian Mobile Belt Lithosphere (from Ocean to Continent): Conference Materials]. 2016, no. 14, pp. 280–282. (In Russian).

15. Chacko T., Hu X.S., Mayeda T.K., Clayton R.N., Goldsmith J.R. Oxygen isotope fractionations in muscovite, phlogopite and rutile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60, pp. 2595–2608. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(96)00112-3) (accessed: 18 October 2011).

16. Zheng Y.-F., Simon K. Oxygen isotope fractionation in hematite and magnetite: a theoretical calculation and application to geothermometry of metamorphic iron formation. *European Journal of Mineralogy*, 1991, vol. 3, pp. 877–886. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0877.

17. Aiurzhanava D.Ts., Izbrodin I.A., Daminova L.B. *Usloviia formirovaniia kvartsitov Kiakhtinskoi gruppy mestorozhdenii po rezul'tatam termometricheskikh issledovaniia* [Formation conditions of quartzites

from Kyakhta deposits based on the results of thermometric studies]. *Materialy XVII Vserossiiskoi konferentsii po termobarogeokhimi* [Proceedings of XVII All-Russian conference on thermobarogeochemistry].

Ulan-Ude: Buryat scientific center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Publ. 2016, pp. 17–19. (In Russian).

#### Критерии авторства

Избродин И.А., Рипп Г.С., Аюржанаева Д.Ц., Посохов В.Ф. подготовили статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Izbrodin I.A., Ripp G.S., Ayurzhanava D.Ts., Posokhov V.F. have prepared the article for publication, have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

*Статья поступила 18.01.2017 г.*

*The article was received 18 January 2017*