

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.11>

УДК 553.546; 553.576

## Ресурсы кварцевого сырья Гарганской зоны Восточносаянского кварцитоносного района

А.М. Федоров<sup>1\*</sup>, В.А. Макрыгина<sup>1</sup>, А.М. Мазукабзов<sup>2</sup>, А.И. Непомнящих<sup>1</sup>,  
Д.Ц. Аюржанаева<sup>3</sup>, М.Г. Волкова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Анализ Восточносаянского кварцитоносного района в качестве сырья на кристаллический кремний и оптическое стекло на основе предложенных геохимических и структурных критериев оценки пород позволяет существенно расширить прогнозные ресурсы этого типа сырья. В работе уточнено геологическое строение продуктивной на высокочистые кварциты иркутской свиты в пределах Ока-Урикского, Уренгенурского и Урдагарганского кварценозных узлов, даны геологические, минералого-петрографические и геохимические характеристики основных типов кварцитов, определены основные морфологические особенности продуктивных тел высокочистых кварцитов для прогнозирования их развития на глубину. Главными факторами формирования тел высокочистых кварцитов является то, что: 1) накопление кварцитов происходит в пределах иркутской кремнисто-карбонатной свиты среднерифейского возраста в обширном, но изолированном бассейне; 2) тела высокочистых кварцитов формируются в результате динамической перекристаллизации, связанной с деформацией исходных микрокварцитов в результате коллизии Дунжугурской островной дуги с окраиной Гарганского микроконтинента. Проведена оценка ресурсов кварцитов западной части Восточносаянского кварценозного района для металлургии кремния и получения оптического кварцевого стекла в количестве 134 млн т.

**Ключевые слова:** кварциты, суперкварциты, геохимия, перекристаллизация, ресурсы кварцевого сырья, Восточный Саян

**Для цитирования:** Федоров А.М., Макрыгина В.А., Мазукабзов А.М., Непомнящих А.И., Аюржанаева Д.Ц., Волкова М.Г. (2021). Ресурсы кварцевого сырья Гарганской зоны Восточносаянского кварцитоносного района. *Георесурсы*, 23(4), с. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.11>

### Введение

Потребление химически чистого природного кремнеземистого сырья, позволяющего получать в процессе обогащения высококачественные концентраты для производства оптического кварцевого стекла и кварцевой керамики, интенсивно растет. Однако дефицит высокочистого природного сырья требует относиться к кварцу как к ключевому стратегическому сырью, не только России, но и многие высокоразвитые страны (Götze, Möckel, 2012; Muller et al., 2007). Главными типами природного сырья для таких отраслей являются жильный кварц, кварцевые ядра пегматитов, кварц аляскитовых гранитов (США) и кварциты. Высокочистые разновидности жильного кварца, в том числе и гранулированного, и кварцевые ядра пегматитов содержат мало примесей, но имеют небольшие ресурсы сырья. Месторождений кварца гранитов в России не выявлено, но этот тип сырья может отличаться высоким качеством, несмотря на то, что требует сложной процедуры извлечения и очистки. Кварциты имеют средние показатели по качеству, но могут быть легко очищены от минеральных примесей. Основную проблему для всех разновидностей составляют структурные и флюидные примеси.

Несмотря на то, что кварциты в литосфере Земли распространены достаточно широко, их высокочистые

разновидности (с содержанием элементов примесей менее десятых долей процента) представляют большую редкость (Воробьев и др., 2003; Götze, Möckel, 2012). В России в настоящий момент кроме месторождения Черемшанское разрабатываемого для получения кристаллического кремния (Царев и др., 2007), известны относительно чистые проявления кварцитов и микрокварцитов в Западном Прибайкалье (Петрова и др., 1996; Макрыгина, Федоров, 2013) и в южной части Западной Сибири (кварциты Антоновской группы) (Ананьева, Коровкин, 2003).

Такие лидеры производства высокочистых кварцевых материалов как Германия и Норвегия традиционно рассматривают кварциты как сырье для получения огнеупорных материалов, кремния и сплавов с кремнием, таких как FeSi (Götze, Möckel, 2012). Однако европейские специалисты не исключают применение кварцитов Норвегии, Швеции и др. при условии отработки технологии обогащения для получения концентратов высокой чистоты даже из кианитовых кварцитов с содержанием SiO<sub>2</sub> менее 80 % (Muller et al., 2007).

Сотрудниками Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН) и производственными предприятиями Иркутской области проводятся многолетние исследования кварцитов с целью прироста минерально-сырьевой базы кварцевых, в том числе высокочистых, материалов России. Весьма перспективными могут быть значительные по ресурсам проявления кварцитов юго-восточной части Восточного Саяна, включающие

\* Ответственный автор: Александр Михайлович Федоров  
e-mail: [sashaf@igc.irk.ru](mailto:sashaf@igc.irk.ru)

© 2021 Коллектив авторов

и разведанное месторождение Бурал-Сардык (Воробьев и др., 2003).

Главной целью статьи является анализ возможности существенного расширения прогнозных ресурсов Восточноаянского кварцитоносного района в качестве сырья на кристаллический кремний, либо оптическое стекло. Анализ проводится на основе детальных геохимических исследований кварцитов месторождения Бурал-Сардык и нескольких кварцитов проявлений с использованием предложенных геохимических и структурных критериев оценки пород.

## Геологическое строение Восточноаянского кварцитоносного района

Восточноаянский кварцитоносный район охватывает северо-западный и северо-восточный склоны выходов Гарганской глыбы. Изучаемые кварциты расположены в западной части в пределах преимущественно кремнисто-карбонатной пачки иркутской свиты среднерифейского возраста (1250 млн лет (Кузнецов и др., 2010)). Она залегает на породах архейского (2,7 млрд лет (Анисимова и др., 2009)) гранитогнейсового фундамента Гарганской глыбы, моноклинально и несогласно, с падением в северо-западных румбах ( $290\text{--}320^\circ$ ) под углами от  $25$  до  $55^\circ$  (рис. 1). Выходы пород иркутской свиты протягиваются неширокой (от 12 км в южной до 0,5 км в северной части) полосой от оз. Урунг-Нур до реки Урик. Они перекрываются мало мощной пачкой кремнистых сланцев уртагольской свиты. Обе свиты составляют чехол Гарганской глыбы.

Породы иркутской свиты в междуречье рек Урда-Гарган и Хойто-Гарган прорываются гранитоидами сумсунурского комплекса возрастом 790 млн л (Кузьмичев, 2004), которые разделяют свиту на северо-восточную и юго-западную части. В северо-восточной зоне выделяется Ока-Урицкий узел с месторождением Бурал-Сардык и несколькими проявлениями высококачественных кварцитов. В юго-западной части выделен Урдагарганский узел, а на левобережье реки Оки Урунгенурский узел. Они ограничены с юга гранитоидами и габброидами мункусардыкского хребта.

Породы иркутской свиты сформировались в обширном, но изолированном бассейне в течение не менее двух значительных по мощности литоциклов. Разрез базальных слоев свиты слагает трансгрессивную часть ритма и представлен мелкогалечными конгломератами, которые вверх по разрезу сменяются гравелистыми песчаниками и алевролитами, а затем светлоокрашенными мелкозернистыми доломитами с линзами кремнистых образований. Пачка, слагающая второй ритм, начинается разнозернистыми кварцевыми песчаниками с галькой кварца, темно-серых кварцитов и доломитов. Выше выделяются пачки массивных, серых известняков и кремнисто-карбонатных пород с маломощным маркирующим горизонтом черных углистых сланцев. Кремнисто-карбонатные породы переходят в аномально чистые хомогенные силициты-кварциты, представляющие собой протолит для образования высококачественных разновидностей кварцитов (сливных и сахаровидных, мелкозернистых темно-серых и осветленных, а также уникальных суперкварцитов). Мощность кварцевой пачки отличается на разных участках и на Ока-Урицком достигает 350–400 метров в районе хребта.

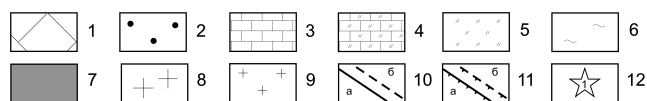
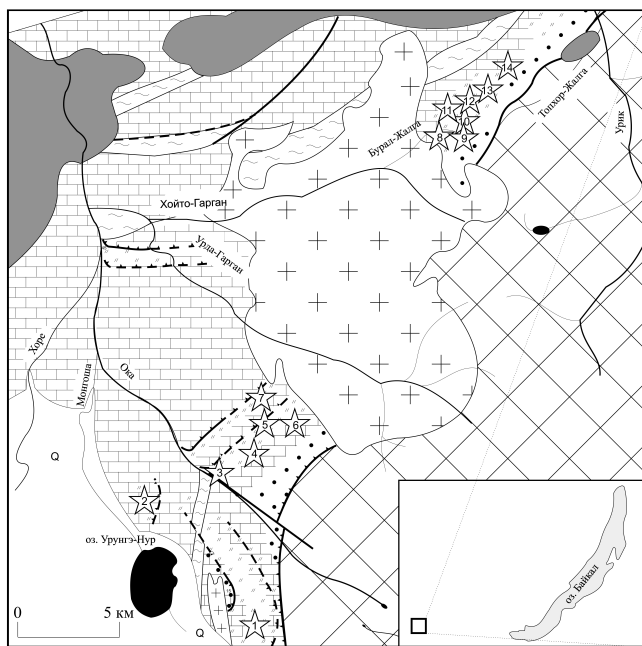


Рис. 1. Схематическая геологическая карта западной части Гарганской глыбы: 1 – фундамент Гарганской глыбы (неоархей); 2–6 – чехол Гарганской глыбы (мезопротерозой): 2 – терригенная пачка иркутской свиты (метапесчаники, гравелиты, кварциты, углистые сланцы); 3 – карбонатная пачка иркутской свиты (кальцитовые и анкерит-доломит-кальцитовые известняки); 4 – кремнисто-карбонатные породы иркутской свиты (кальцитовые и анкерит-доломит-кальцитовые известняки с прослоями кварцитов-силицитов); 5 – кварциты-силициты иркутской свиты; 6 – сланцы уртагольской свиты; 7 – офиолитовый комплекс нерасчлененный (неопротерозой); 8 – гранитоиды сумсунурского комплекса (неопротерозой); 9 – гранитоиды мункусардыкского комплекса (нижний палеозой ?); 10 – тектонические нарушения (а – достоверные, б – предполагаемые); 11 – надвиги (а – достоверные, б – предполагаемые); 12 – кварцевые проявления и их номера: Урунгенурский узел: 1 – Урунгенурский, 2 – Монгошинский; Урда-Гарганский узел: 3 – Окинский-1, 4 – Кварцитовый отрог, 5 – Семерка, 6 – Белая Сопка, 7 – Окинский-2; Ока-Урицкий узел: 8 – Юго-Западный, 9 – Южный, 10 – месторождение Бурал-Сардык (Северный), 11 – Северо-Западный, 12 – Северо-Восточный-1, 13 – Северо-Восточный-2, 14 – Кварцевая Сопка.

Структурно-геологические данные, полученные в пределах изученной площади, позволили выделить несколько разрывных нарушений, различающихся по характеру преобразования, и выраженные в рассланцевании, милонитизации, отальковании и брекчировании пород. Нарушения, отмеченные в привершинной части хребтов, протягиваются в северо-восточном направлении, а нарушения, закартированные у их оснований, имеют ярко выраженный сдвиго-надвиговой характер и относительно пологие углы падения поверхности сместителя от  $15$  до  $45^\circ$  в северо-западном направлении (рис. 1). Кроме того, в пластичных карбонатных породах отмечаются редкие асимметричные складки, позволяющие реконструировать вектор сжатия, направленный с северо-запада на юго-восток.

В результате коллизии Дунжугурской островной дуги (1 млрд л) с Гарганским микроконтинентом около 800 млн лет назад (Кузьмичев, 2004), произошла

обдукция офиолитов на окраину микроконтинента. Обдукционные породы перекрыли осадочный чехол, в процессе продвижения смяли его в складки и разделили на отдельные, надвинутые друг на друга пластины. При поднятии Гарганской глыбы в процессе ее гранитизации и внедрения сумсунурских гранитоидов офиолитовый покров был эродирован. Фрагменты его сохранились в виде останцов, обрамляющих глыбу по периферии (рис. 1).

Геологическое строение площади и геохимические и петрологические особенности месторождения Бурал-Сардык описаны в ряде предыдущих работ (Воробьев и др., 2003; Федоров и др., 2011; 2012; Макрыгина, Федоров, 2013; Волкова и др., 2017; Непомнящих др., 2018; Волкова и др., 2019; Fedorov et al., 2019; Мазукабзов и др., 2020; Аюржанаева и др., 2020).

### Методика исследований

Пробы кварцитов и кварцевых концентратов анализировались в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), пламенной фотометрии (ПФ) и атомного эмиссионно-спектрального анализа (АЭСА).

Методика предварительной пробоподготовки необогащенных проб высокочистого кварцевого материала для анализов производилась по единой схеме: промывка образца кварцита в дистиллированной воде; предварительное механическое дробление; химическая чистка фракции  $-5$  –  $+20$  мм от сорбированных компонентов на поверхности в 10 % растворе особо чистой соляной кислоты (HCl); стадия термодробления путем нагрева до  $900^{\circ}\text{C}$  и охлаждения деионизированной водой; измельчение в ступке и пестиком, изготовленными из «суперкварцита» месторождения Бурал-Сардык, и классификация фракции  $-0,1$  –  $+0,5$  мм. Для анализа методами ICP-MS и ПФ пробы кварца растворяли в смеси  $\text{HF-HNO}_3$  в автоклавах при  $160$ – $180^{\circ}\text{C}$ . Для предотвращения потерь бора добавляли 1 % раствор маннита. Основной элемент отгоняли в виде тетрафторида кремния при выпаривании с HF при  $60$ – $80^{\circ}\text{C}$ . Все стадии пробоподготовки выполнены в условиях чистой комнаты с использованием реагентов высокой степени чистоты и ультрачистой деионизированной воды ( $> 18,2 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$ , Simplicity, Millipore).

Определение примесей методом ICP-MS проводили с помощью масс-спектрометра высокого разрешения с двойной фокусировкой ELEMENT-2 (FinniganMAT, Germany). В качестве внутреннего стандарта добавляли Rh ( $3 \text{ ng mL}^{-1}$ ). Для анализа применяли многоэлементные стандартные растворы: CLMS-2 и CLMS-4 (Spex, USA), ICPsolution X Certipur (Merck, Germany) и IQC-026 (Ultrascientific, USA).

Для выполнения определений методом АЭСА использована спектральная установка, включающая дифракционный спектрограф ДФС-458 С (ПО КОМЗ, г. Казань), многоканальный анализатор эмиссионных спектров МАЭС на основе микросборки фотодиодных линеек, электродуговой генератор «Везувий» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск).

Определение содержания примесей щелочных металлов Na, K и Li в дополнение к АЭСА проводилось методом ПФ с использованием пламенного фотометра на основе спектрометра ДФС-12 (ЛОМО, Россия) в пламени

пропан-воздух. Сигналы эмиссии регистрировали на длине волны  $589,0$  нм для Na,  $766,5$  нм для K и  $670,8$  нм для Li. Для градуировочной зависимости применяли стандартные растворы, приготовленные из хлоридов, с концентрацией аналитов от  $0,04$  мкг/мл до  $0,2$ – $0,5$  мкг/мл. Правильность определения оценивали с помощью анализа образцов IOTA STANDARD и IOTA 4 (Unimin, USA) или методом добавок.

Для расшифровки структуры рудных зон выполнялись тектонические исследования на макро и микроуровне. Макроисследования проводились традиционными методами геологического картирования в детальном масштабе. В процессе работы фиксировались состав и условия залегания горных пород, складчатые и разрывные дислокации. С целью выяснения формирования структур и механизма преобразования пород в процессе деформации использовались методы, рекомендуемые для микроструктурного анализа. Эти работы сопровождалась отбором ориентированных штуфов для последующего петроструктурного анализа. В камеральный период были изготовлены шлифы, для исследования которых использовался поляризационный микроскоп и федоровский столик. По результатам микроструктурного анализа установлена доминирующая ориентировка линейных кварцевых агрегатов, режим деформации и ориентировка стресса.

Расчет прогнозных ресурсов Восточноаянского кварцитоносного района проведен геометрическим методом путем умножения площади выхода подсчетных блоков кварцитов на предполагаемую мощность. Мощность оценивалась по естественным обнажениям. Плотность кварцита принята соответствующей плотности кварца, без учета разуплотнения в ослабленных тектоническими процессами участках. Расчеты выполнены на основании полевых исследований трех блоков – Урдагарганского, Уренгенурского и Ока-Урикского, без учета запасов, утвержденных по месторождению Бурал-Сардык (Северный участок) и выделения некондиционных блоков.

### Проявления кварцитов

#### Восточноаянского кварцитоносного района

В настоящее время в пределах Восточноаянского кварцитоносного района выделяется восемнадцать проявлений кварцитов, сгруппированных в четыре зоны: Гарганскую, Харанурскую, Онотскую и Ильчирскую. Большая часть проявлений относится к Гарганской зоне (табл. 1). Зоны различаются как по составу интрузивных пород и продуктивных тел, так и по структурно-тектоническим условиям. Западная (Гарганская) и северная (Харанурская) зоны иркутной свиты отличаются от восточных (Ильчирская и Онотская зоны) более мощными кремнистыми пачками, а также более пологим падением слоев. Азимуты падения слоев также отличаются: Гарганская и Харанурская зоны имеют падение в северо-западном направлении, а Ильчирская – в юго-восточном.

Онотская зона характеризуется сложным строением в пределах крупной антиклинальной складки (Поисковые работы..., 2006).

#### Кварциты Ока-Урикского узла

Значительная часть Ока-Урикского блока занята образованиями иркутной свиты, в составе которой выделяются

Кварцитоносные узлы	Проявления (участки) и месторождения кварцитов
Ока-Урицкий	Северный (месторождение Бурал-Сардык), Северо-Восточный, Северо-Западный, Юго-Западный, Южный, Кварцитовая Сопка
Урда-Гарганский	Семерка, Кварцитовый отрог, Белая Сопка, Окинский-1, Окинский-2
Уренгенурский	Уренгенурский, Монгошинский ?

Табл. 1. Проявления и группировка кварцитов в пределах Гарганской зоны Восточноянского кварцитоносного района

нижняя карбонатная и верхняя кварцитовая части (рис. 2). Кварцитовая пачка сложена кварцитами песчано-алевритовой размерности и микрокварцитами общей мощностью около 300 м. Карбонатная часть состоит из темно-серых кальцитовых известняков с прослоями полосчатых доломитов и постройками строматолитов. Выходы карбонатов располагаются примерно в центральной части площади и, вероятно, слагают рамповую антиклиналь, шарнир которой погружается в северо-восточном направлении. Породы свиты прорваны дайками габбро предположительно вендского возраста и гранитоидами сумсунурского комплекса позднего рифея. Дизъюнктивная тектоника проявлена зонами повышенной трещиноватости и фрагментом детачмента (зона срыва). Вблизи интрузивных тел карбонаты интенсивно метасоматизированы.

Месторождение Бурал-Сардык расположено на высоте 2600 м в осевой части ассиметричного хребта, разделяющего водотоки рек Урика и Гаргана. Оно тяготеет к северо-западному контакту иркутской свиты с архейскими гранитоидными Гарганской глыбы.

Среди пачек кварцитов выделяются тела белоснежных суперкварцитов и светло-серых мелкозернистых кварцитов, локализующихся на вершине хребта в виде пластов или линз с пологим погружением на северо-запад. Суперкварцит представляет собой мономинеральную породу белого цвета, в которой на фоне мелкозернистой основной массы выделяются крупные зерна прозрачного кварца (Воробьев и др., 2003). Суперкварциты и светло-серые мелкозернистые кварциты подстилаются серыми и еще ниже – темно-серыми и черными тонкозернистыми кварцитами. В западной части участка среди осветленных разновидностей кварцитов выделен новый тип исходно чистых кварцитов – сливные кварциты (Непомнящих и др., 2018). Сливные кварциты представляют собой породу с массивной текстурой, без видимых минеральных включений, за исключением редких тончайших чешуек серицита по границам зерен (Волкова и др., 2019). Цвет пород характеризуется содержанием углеродистого вещества в виде графита. При этом содержание органического углерода (анализ выполнен сотрудницей ИГХ СО РАН Развозжаевой Э.А.) в кварцитах месторождения Бурал-Сардык изменяется от 0,63 % и более в темно-серых кварцитах до 0,36 % в серых и менее 0,2 % в «суперкварцитах». Следует при этом отметить, что содержания нерастворимого  $C_{орг}$ , как в пробах месторождения Бурал-Сардык, так и проявлений Урдагарганского участка, несколько завышены, поскольку при анализе не проводилось отделение углеродсодержащих включений из газовой-жидкой составляющей пород. Мощность суперкварцитов достигает

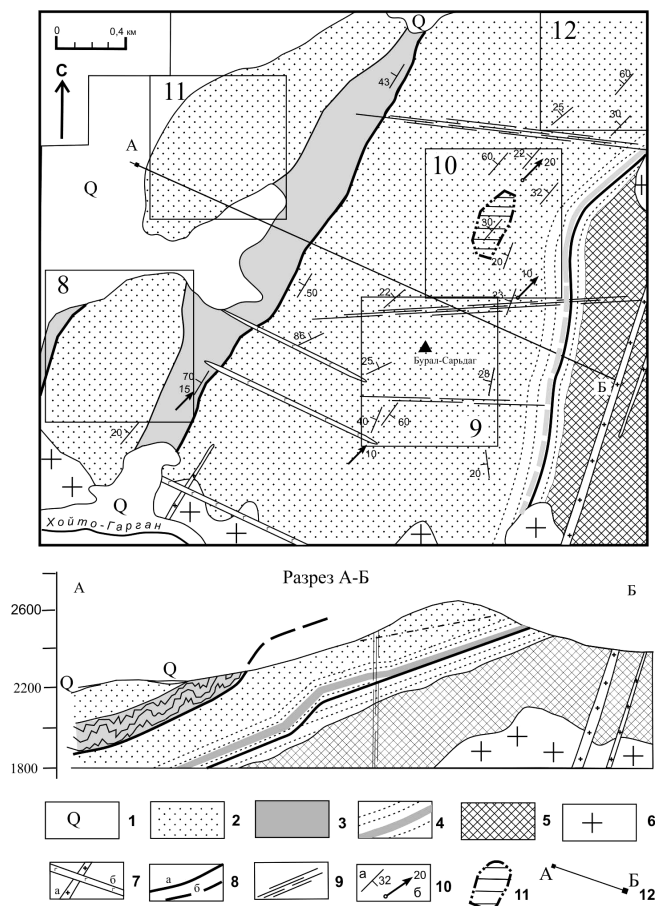


Рис. 2. Геологическая карта Ока-Урицкого блока с месторождением Бурал-Сардык. 1 – четвертичные отложения; 2 – 4 иркутская свита (мезопротерозой): 2 – кварциты, 3 – карбонатные породы, 4 – разнозернистые кварцевые песчаники, гравелиты; 5 – тоналиты и гранитоиды неархей (Гарганская глыба); 6 – гранитоиды сумсунурского комплекса (неопротерозой); 7 – дайки габбро (ранний палеозой ?); 8 – зона срыва (детачмент), а – достоверная, б – предполагаемая; 9 – зоны повышенной трещиноватости; 10 – элементы залегания: а – слоистости, б – погружение шарниров; 11 – контуры разведанного участка; 12 – линия разреза. Примечание: На разрезе штрих-пунктиром разделены разновидности кварцитов: светлые однородные находятся выше линии разграничения, а ниже располагаются темно-серые до черных.

6 метров, а светло-серых мелкозернистых кварцитов более 30 метров, приблизительная мощность сливных кварцитов составляет первые десятки метров. Мощность темно-серых и черных мелкозернистых кварцитов может достигать 300 метров в районе хребта.

Структурно-геологические исследования Ока-Урицкого узла позволяют внести корректировку в представления о структуре района. Для него не характерны крупные изоклинные складки, к антиклинальным замкам которых, по мнению Е.И. Воробьева (Воробьев, 2003), приурочены проявления суперкварцитов. В разрезе месторождения преобладают слабoplastичные образования (кварциты и кремнисто-карбонатные породы), что сказалось на деформационных свойствах толщи. Это привело к тому, что в кварцитах возникали маломощные срывы, согласные полосчатости и редкие ассиметричные складки продольного изгиба с погружением осевых поверхностей в северо-западном направлении. При этом синхронно в горизонте известняков, располагающихся

среди кварцитов, возникли разномасштабные складки изгиба и срывы. По своей сути этот горизонт является зоной вязкого межслойного надвига с перемещением в юго-восточном направлении. Подобный структурный парагенезис обусловлен продольным сжатием по линии СЗ–ЮВ и наличием близко расположенного фундамента Гарганской глыбы (Мазукабзов и др., 2020).

Петроструктурный анализ кварцитов месторождения (Федоров и др., 2012; Fedorov et al., 2019; Аюржанаева и др., 2020) позволяет полагать, что ведущим механизмом их очищения является механохимический процесс при деформации пород. Предполагаемая причина сокращения включений водно-солевой фазы в кварце – миграция включений внутри кристалла и выход на межзерновые границы. Движущей силой миграции являются градиенты полей температуры и векторного давления под воздействием остаточной энергии деформации (Аюржанаева и др., 2020; Чердниченко, 1964). Новый взгляд на структуру проявлений с размещением тел перекристаллизованных кварцитов в полого залегающей пачке кремнистых пород позволяет расширить поиски перспективных участков суперкварцитов в районе.

Геохимические особенности кварцитов Ока-Урикского блока рассмотрены на примере наиболее хорошо изученных кварцитов месторождения Бурал-Сардык (участок Северный) и участка Северо-Восточный 1. Суперкварциты отличаются особенно низким содержанием элементов-примесей и почти полным отсутствием пигментирующего углеродистого материала. По-видимому, это не только самая химически чистая разновидность кварцитов на месторождении Бурал-Сардык, но и выдающаяся по чистоте разность во всем семействе кварцитов мира (Воробьев и др., 2003, Götze, Möckel, 2012).

По содержанию петрогенных, редких и редкоземельных элементов (Федоров и др., 2012; Fedorov et al., 2019) кварциты месторождения Бурал-Сардык четко можно разделить на две группы:

1) *продуктивная толща (или продуктивные пластовые тела)* объединяет кварциты с низкими содержаниями элементов-примесей. Продуктивная пачка кварцитов месторождения Бурал-Сардык содержит в сумме примесей около 400 ppm в черных и темно-серых кремневидных, 250 ppm в светло-серых и серых и около 50 ppm в суперкварцитах (Федоров и др., 2012; Fedorov et al., 2019) и сливных кварцитах. Осветленные высокочистые разновидности кварцитов составляют около 1 % от объема всей толщи кварцитов иркутской свиты (табл. 2).

2) *приконтактные кварциты*, тяготеющие к контакту с гранодиоритами сумсунурского комплекса. В них содержание петрогенных и редких элементов выше, чем в кварцитах продуктивной толщи: по Mn, Fe, Ca, Na, K, V и Zr – в 10–20 раз, по Ti, Li, Sc, Sr и Ba – в 20–30 раз, по Al, V, Rb, Cs – около двух порядков. В среднем содержание суммы петрогенных элементов в приконтактных

кварцитах более чем в 30 раз выше, чем в кварцитах пластовых продуктивных тел месторождения и составляет от 0,5 до 2,4 % (в среднем 1,3 %) (Федоров и др., 2012; Fedorov et al., 2019).

Полученные геохимические данные по кварцитам иркутской свиты позволяют предполагать, что по содержанию элементов-примесей практически вся их пачка, кроме приконтактных, может быть использована как сырье для получения кристаллического кремния. Для точного определения подсчетных блоков и исключения зон приконтактных метасоматических изменений и интрузивных тел необходимо проводить детальные оценочные и разведочные работы, а также технологические испытания на предприятиях, производящих кремний.

Кроме участка Северный с месторождением Бурал-Сардык в 2017 году был детально опробован участок Северо-Восточный-1 (табл. 3).

Содержание элементов-примесей в кварцитах Северо-Восточного-1 участка закономерно увеличивается от порфириовидных к мелкозернистым с порфириовидными включениями и к мелкозернистым серым и темно-серым. Содержания видимых минеральных примесей, представленных преимущественно серицитом и гидроксидами железа, крайне незначительны и слабо влияют на общий состав пород. Значимая корреляция содержания углеродистого вещества с содержанием примесей в породах указывает на то, что основная их часть находится в межзерновом пространстве. Содержания лития, бора, фосфора и меди в разных типах кварцитов отличаются незначительно, что говорит об их, вероятно, структурном положении и удалении при перекристаллизации части пород. Корреляция содержаний алюминия и калия указывает на их нахождение в составе серицита.

Эксперименты по очистке кварцитов, проведенные в ИГХ СО РАН (Воробьев и др., 2003; Непомнящих и др., 2018, 2019), позволяют сделать заключение о том, что кварциты с порфириобластовой структурой (суперкварциты и их аналоги) могут быть использованы для получения оптического кварцевого стекла (Технические условия «Кварцевые...», 1997). Поэтому в выборку для таблицы 3 отбирались порфириовидные кварциты и мелкозернистые кварциты с порфириовидными включениями без видимых минеральных включений. Мелкозернистые кварциты по содержанию аморфного углерода подразделяются на светло- и темно-серые разности вне зависимости от содержания видимых минеральных включений. Поскольку на поверхности в пределах разведанного участка интрузивные тела не отмечены, выделять приконтактные кварциты по аналогии с месторождением Бурал-Сардык только по содержанию элементов примесей некорректно.

### Кварциты Урдагарганского узла

Наиболее распространенными породами в пределах Урдагарганского узла являются кварциты иркутской свиты,

Тип кварца/участок/кол-во проб	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ10
Суперкварцит / м-е Бурал-Сардык / 59 проб	6	27	1.7	0.8	1	0.17	0.02	3.5	6.3	0.13	46.6
Мелкозернистый / м-е Бурал-Сардык / 11 проб	7.1	65.9	2.4	4.6	4.4	0.16	0.09	5.9	23.9	0.14	115
Сливной / уч-к Юго-Западный / 12 проб	4.9	10.4	0.3	7.3	0.9	0.2	0.1	19.3	6.2	0.3	50

Табл. 2. Средние содержания элементов-примесей в высокочистых образцах кварцитов Ока-Урикского узла, (ppm). Анализы выполнены методом ICP MS в ИГХ СО РАН. Аналитики Сокольников Ю.В., Пахомова Н.Н. и Пономарева В.Ю.

Типы Эл-ты	Порфириовидные кварциты без видимых минеральных примесей (24)		Мелкозернистые с порфириовидными включениями без видимых минеральных примесей (38)		Мелкозернистые серые кварциты (119)		Мелкозернистые темно- серые кварциты (57)	
	мин	Среднее макс	мин	Среднее макс	мин	Среднее макс	мин	Среднее макс
<b>Al</b>	57	<b>250</b> 486	67	<b>310</b> 1077	53	<b>310</b> 1260	76	<b>496</b> 4191
<b>Ti</b>	4.11	<b>12.68</b> 34.96	2.90	<b>17.04</b> 56.55	1.57	<b>16.84</b> 77.44	1.90	<b>26.95</b> 258.65
<b>Fe</b>	10.45	<b>37.12</b> 78.04	0.05	<b>29.06</b> 110.28	0.06	<b>47.95</b> 444.17	7.99	<b>86.77</b> 991.05
<b>Mn</b>	0.05	<b>0.12</b> 0.28	0.04	<b>0.32</b> 8.31	0.03	<b>2.71</b> 72.25	0.04	<b>0.34</b> 3.85
<b>Mg</b>	5.11	<b>22.60</b> 50.34	6.84	<b>38.63</b> 138.39	2.39	<b>33.48</b> 134.26	2.50	<b>66.81</b> 597.81
<b>Ca</b>	2.15	<b>9.46</b> 17.64	2.23	<b>8.33</b> 20.09	0.08	<b>9.67</b> 56.98	0.32	<b>10.22</b> 80.06
<b>Na</b>	4.50	<b>6.74</b> 23.09	4.07	<b>7.58</b> 12.32	2.12	<b>8.11</b> 131.02	3.10	<b>14.34</b> 213.87
<b>K</b>	44	<b>115</b> 247	36	<b>174</b> 579	14	<b>148</b> 691	21	<b>248</b> 2244
<b>Li</b>	0.04	<b>0.12</b> 0.52	0.04	<b>0.14</b> 0.41	0.01	<b>0.11</b> 0.56	0.03	<b>0.18</b> 1.37
<b>B</b>	0.35	<b>0.67</b> 1.16	0.18	<b>0.83</b> 3.15	0.04	<b>0.60</b> 5.66	0.21	<b>0.84</b> 4.40
<b>P</b>	0.65	<b>3.93</b> 10.50	0.70	<b>3.61</b> 7.93	0.06	<b>4.23</b> 20.20	0.97	<b>4.36</b> 19.23
<b>Cu</b>	0.17	<b>0.32</b> 0.81	0.10	<b>0.22</b> 0.42	0.08	<b>0.28</b> 3.23	0.12	<b>0.30</b> 1.50
<b>Сумма</b>	190	<b>459</b> 876	163	<b>589</b> 1914	113	<b>582</b> 2263	141	<b>954</b> 7471

Табл. 3. Содержания элементов-примесей в кварцитах Северо-Восточного участка Ока-Урикского узла (ppm). Анализы выполнены методом ICP MS в ИГХ СО РАН. Аналитики Сокольников Ю.В., Пахомова Н.Н. и Пономарева В.Ю.

в меньшей мере карбонаты, в том числе и скарнированные. Кварциты представлены пятнисто-полосчатыми и массивными мелкозернистыми разновидностями с широкой гаммой расцветок – от темно-серых до белых. Изредка в виде маломощных линз или прослоев встречаются высококислотные разновидности кварцитов (суперкварциты), а также сливные кварциты.

Практически все разновидности кварцитов характеризуются слабой ожелезненностью, тонким прожилкованием карбонатного и кварцевого состава, наличием каверн, заполненных оксидами железа и тонким глинистым и охристым веществом. Размерность зерен в разных образцах отличается от неразличимых невооруженным глазом до крупных (первые мм) монокристаллов кварца. На некоторых участках породы, подвергшиеся деформационным процессам, слабо рассланцованы или разбиты системой трещин, отчасти заполненных охристым веществом.

Детальное изучение строения продуктивных пластовых тел высококислотных разновидностей кварцитов Урдагарганского узла показало, что они могут формироваться не только в верхней, но и в средней части пачки темно-серых мелкозернистых кварцитов и связаны с проявлением тектонических деформаций. Для крупных тел границы между темно-серыми и осветленными разновидностями, вплоть до появления порфириовидных кварцитов, преимущественно постепенные, у маломощных – часто резкие.

В геохимическом отношении кварциты проявления Семерка Урдагарганского узла представляют собой довольно чистые разновидности (табл. 4). На проявлении Семерка наиболее химически чистыми разновидностями также

являются суперкварциты и сливные кварциты от белых до темно-серых. Минимальные содержания суммы лимитируемых элементов-примесей в отдельных пробах сливных кварцитов составляют около 30 ppm, при средних значениях чуть более 100 ppm по 8 пробам. Средние содержания суммы петрогенных элементов в темно-серых сливных кварцитах составляют около 800 ppm.

На контакте с известняками в суперкварцитах наблюдается повышение содержания кальция, магния, железа и марганца. Темно-серые кварциты характеризуются значительным разбросом значений содержаний элементов-примесей, также связанным с содержанием карбонатной примеси.

Довольно сложная форма и взаимоотношения продуктивных тел с породами вмещающей карбонатной пачки и интрузивными телами различного состава не позволяют четко отследить закономерности распределения содержаний элементов с цветовым индексом породы. Некоторые темные разновидности кварцитов могут содержать намного меньше примесей, чем их осветленные разновидности. Наилучшей корреляцией связаны алюминий и калий из-за примеси серицита, наихудшей корреляцией с другими элементами обладают Mn и Cu. Сравнение этого показателя с другими участками кварцитов может говорить о типоморфной характеристике всей кремнистой пачки иркутской свиты.

Тем не менее, по геохимическим признакам кварциты проявления Семерка четко подразделяются на два типа: темно-серые и черные кварциты и осветленные мелкозернистые кварциты, включая и аналоги «суперкварцитов» и сливных кварцитов месторождения Бурал-Сардык.

Участок	Семерка					Сопка Белая					
	Белый и светло-серый кварцит (8)		Темно-серый и черный кварцит (3)			Кварцит белый (8)		Кварцит темно-серый (3)			
	Среднее		Среднее			Среднее		Среднее			
Эл-ты	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	
<b>Al</b>	7	<b>55</b>	117	130	560	21	<b>511</b>	1529	73	<b>758</b>	2077
<b>Ti</b>	1.00	<b>1.58</b>	2.10	5.80	35	2.60	<b>28</b>	69.70	4.98	<b>63</b>	174
<b>Fe</b>	1.40	<b>4.13</b>	11.00	7.20	33	5.90	<b>125</b>	630	76.50	<b>593</b>	1559
<b>Mn</b>	0.10	<b>0.38</b>	1.00	0.08	0.2	0.15	<b>7.10</b>	41	2.20	<b>65.01</b>	175
<b>Mg</b>	0.20	<b>4.03</b>	15.00	21	257	29	<b>826</b>	4957	9	<b>3673</b>	10575
<b>Ca</b>	6.60	<b>8.10</b>	11.50	8.40	16	8.50	<b>1114</b>	7208	18.70	<b>9397</b>	27753
<b>Na</b>	4.80	<b>8.95</b>	11.70	9.30	17.5	8.80	<b>54.15</b>	205	11.70	<b>291</b>	845
<b>K</b>	1.40	<b>20.44</b>	60.00	41	343	4.90	<b>233</b>	739	26.70	<b>799</b>	2336
<b>Li</b>	0.10	<b>0.23</b>	0.89	0.16	1.1	0.65	<b>1.77</b>	2.71	0.20	<b>0.69</b>	1.00
<b>B</b>	0.70	<b>1.34</b>	2.20	2.40	16	0.15	<b>0.59</b>	1.76	0.60	<b>0.93</b>	1.20
<b>P</b>		нд		нд		0.20	<b>5.19</b>	50.90	3.35	<b>20.04</b>	51.00
<b>Cu</b>	0.07	<b>0.15</b>	0.21	0.09	0.13	0.22	<b>0.36</b>	0.59	0.56	<b>0.61</b>	0.65
<b>Сумма</b>	30.26	<b>105</b>	182	249	1223	87.15	<b>2907</b>	15415	228	<b>15662</b>	45551

Табл. 4. Средние содержания элементов-примесей в кварцитах Урдагарганского узла (ррт). Анализы выполнены методом АЭСА в ИГХ СО РАН. Аналитик Васильева И.Е. Анализы Na, K и Li выполнены методом ПФ в ИГХ СО РАН. Аналитик Сокольников Ю.В.

Высокоочищенные разновидности обогащались до высоких степеней очистки химическими и физическими методами (Непомнящих и др., 2017, 2018, 2019), а в качестве примера приведем результаты обогащения сливных кварцитов (табл. 5). Полученный результат позволяет рассчитывать на перспективы этого типа сырья (Непомнящих и др., 2019).

### Оценка ресурсного потенциала Гарганской зоны Восточно-Саянского кварцитоносного района

Детальные исследования кварцитов Восточного Саяна и их оценка начались во второй половине XX века. Первая оценка кварцитов как химически чистого кварцевого сырья выполнена П.А. Рошкетаяевым в 1976 году. Площадь между реками Окой и Хойто-Гарганом определена, как наиболее перспективная для выявления таких кварцитов (Рошкетаяев и др., 1976). В 1982 С.А. Прохором в бассейне р.

Дабан-Жалга, левого притока р. Онот, в его верховьях, обнаружено проявление кварцитов Дабанжалгинское, детально изученное с подсчетом прогнозных ресурсов по категориям Р<sub>2-3</sub> сотрудниками ВНИИСИМС (Мальшев и др., 1988). При проведении в 1987–1990 гг. геологического изучения этого региона в масштабе 1:50 000 А.М. Рогачевым (Рогачев и др., 1991) сделана первая попытка их оценки, как сырья для производства кварцевого стекла. По итогам этих работ были выделены участки Бурал-Сардыкский, Холбинский, Окинский-1 и Окинский-2. Результатом начального периода исследований является выделение Восточно-Саянского кварцитоносного района, с наиболее перспективной Гарганской зоной, оконтуренной по западной и северо-западной периферии выходов Гарганской глыбы.

Дальнейшие исследования с 1997 г. по настоящее время проводились сотрудниками Института геохимии СО РАН, в результате которых охарактеризованы основные виды кварцитов, в том числе совершенно новые

№№	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ
509	109	157	13.5	8.4	12.7	0.34	14.2	8.9	69.6	0.14	393.8
511	29.2	83.8	3.6	6.7	6.4	0.19	0.87	6.5	34.0	0.11	171.4
517	18.7	69.6	3.8	3.1	6.3	0.13	0.91	5.4	27.2	0.15	135.3
520	0.3	10.0	2.4	2.7	0.6	0.09	0.049	4.5	1.8	0.15	22.6
524	0.4	9.0	2.0	5.4	0.9	0.20	0.12	3.4	0.6	0.27	22.3

Табл. 5. Содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах из сливного кварцита, ррт. 509 – Сливной кварцит после ручной рудоразборки, фракция 1,7–15 мм. 511 – Сливной кварцит после ручной рудоразборки и травления 10 % HCl, фракция 1,7–15 мм. 517 – Проба 511 после истирания до фракции 100–300 мкм. 520 – Сливной кварцит после рудоразборки, травления, фракция 100–300 мкм, химического обогащения HCl (20 %): HF (20 %) = 3:1. 524 – Сливной кварцит после рудоразборки, травления, фракция 100–300 мкм, химического обогащения 20 % HCl, отжига на воздухе – 400 °С – 3 часа и 1450 °С – 3 часа и химического обогащения HCl (20 %): HF (20 %) = 3:1. Технолог О.Н. Соломеин, анализы выполнены методом ICP MS, аналитик В.Ю. Пономарева.

– суперкварциты и сливные кварциты. Основным результатом работы стало составление первой геологической схемы месторождения Бурал-Сардык, и предложены первые геологические и генетические модели, подсчитаны прогнозные ресурсы кварцитов в количестве 22,5 млн т (Геолого-геохимические..., 2001; Воробьев и др., 2003).

В 2001–2003 гг. ООО «Ока-К» получило лицензию на проведение поисковых и оценочных работ на особо чистый кварц на Бурал-Сардыкском участке. В сотрудничестве с Институтом геохимии СО РАН была проведена оценка северной части хребта Бурал-Сардык и разведано одноименное месторождение с подсчетом запасов суперкварцитов для производства кварцевой крупки и микрокварцитов для металлургии.

В 2001–2005 г. проведены поисковые работы масштаба 1:25 000 на кварцевое сырье ОАО ВЗПК под руководством В.Н. Яшина (Поисковые работы..., 2006) по 11 проявлениям, и дана оценка прогнозных ресурсов, как на особо чистое кварцевое сырье, по пяти из них.

В процессе изучения геохимических, минералогическо-петрографических и геолого-структурных особенностей кварцитов западного обрамления Гарганской глыбы проведена обобщающая предварительная оценка обследованных проявлений с учетом выделения отдельных типов сырья. По результатам исследования можно сделать заключение, что наиболее перспективным по объему, типам высококачественного сырья и условиям горных работ является Ока-Урикский узел. Следующий по значимости Урдагарганский узел в настоящее время активно изучается как силами научных организаций Иркутска и Республики Бурятия, так и производственными предприятиями, проводящими поисково-оценочные и разведочные работы. Перспективы Уренгенурского участка не ясны вследствие высоких содержаний карбонатной примеси, хотя пробные

плавки из отдельных проб дают положительные результаты. Оценка прогнозных ресурсов Гарганской кварцитоносной зоны показаны в таблице 6.

### Обсуждение результатов

В пределах Гарганской кварцитоносной зоны в настоящее время, наиболее изученными являются месторождение Бурал-Сардык Ока-Урикского узла и проявления Семерка и Сопка Белая Урдагарганского узла, которые вполне сопоставимы по типам высококачественного кварцевого сырья. В пределах этих участков отмечаются общие закономерности, указывающие на единый процесс образования тел высококачественных кварцитов. В первую очередь – это *геологическое размещение*, когда осветленные и более чистые разновидности, вплоть до суперкварцитов, представляют собой относительно маломощные прослои и линзы среди темных микрозернистых кварцитов. Мощность прослоев осветленных кварцитов от первых сантиметров до первых метров (крайне редко первых десятков метров). Так на месторождении Бурал-Сардык наиболее изученное тело суперкварцитов имеет мощность не менее 6 метров. Кроме того, в результате исследований обнаружены прослои осветленных кварцитов мощностью до 1 метра среди темно-серых мелкозернистых кварцитов в пределах Южного участка Ока-Урикского узла. В пределах Урдагарганского узла также отмечено подобное тело среди кварцитов Кварцитового отрога мощностью до 5 метров.

Сходные *структурные особенности*, проявившиеся в том, что в слабоизмененных кварцитах сохранилась первичная осадочная полосчатость с углами падения от 25 до 70°, которая сечется под пологими углами (10–20°) маломощными зонами осветления. Сопоставление измеренных углов падения слоистости и полосчатости в разных коренных обнажениях и крупных глыбах

Узел/участок (проявление)	Тип	Длина, м	Ширина, м	Мощность, м	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, тыс. т
<b>Ока-Урикский</b>							
Северо-Восточный 1	мелкозернистые	350	50	20	350	2.60	910
Северо-Восточный 2	мелкозернистые	400	50	50	1 000	2.60	2 600
Юго-Западный	мелкозернистые	350	200	50	3 500	2.60	9 100
Юго-Западный	<i>Сливной</i>	100	50	5	25	2.60	65
Северо-Западный	мелкозернистые	200	150	50	1 500	2.60	3 900
Южный	мелкозернистые	300	300	50	4 500	2.60	11 700
Южный	<i>суперкварциты</i>	150	150	1	22.5	2.60	58.5
<b>Всего</b>							<b>28 300</b>
<b>Уренгенурский участок</b>	микрозернистые с прослоями карбонатов	1 000	200	50	10 000	2.60	<b>26 000</b>
<b>Урдагарганский</b>							
Семерка	мелкозернистые	500	200	50	5 000	2.60	13 000
Белая Сопка	мелкозернистые	150	100	25	375	2.60	975
Кварцитовый Отрог	мелкозернистые	1 500	300	50	22 500	2.60	58 500
Кварцитовый Отрог	<i>суперкварциты</i>	300	50	5	75	2.60	195
Окинский 1	мелкозернистые	200	150	50	1 500	2.60	3 900
Окинский 2	мелкозернистые	300	200	20	1 200	2.60	3 120
<b>Всего</b>							<b>80 000</b>
Всего по кварцитоносному району							<b>134300</b>
из них высококачественных разновидностей (суперкварциты и сливные кварциты):							<b>300</b>

Табл. 6. Прогнозные ресурсы Восточноаянского кварцитоносного района

элювиально-делювиальных развалов свидетельствует о том, что первичная слоистость, в подавляющем большинстве замеров, имеет более крутое падение и сечется более поздней полосчатостью с падением около 5–15 градусов, связанной с сеткой трещиноватости. Данное наблюдение хорошо согласуется с моделью образования «суперкварцитов» в результате перекристаллизации исходных микрозернистых кварцитов в условиях термобарических градиентов и неоднородностей, вызванных дискретно-динамическим воздействием тектонического покрова, продвигавшегося в юго-восточном направлении при обдукции (Федоров и др., 2011) или в северо-западном в результате завершения обдукционного режима и последовавшего изостатического воздымания Гарганской глыбы и оползания офиолитов по ее чехлу (Федоров и др., 2012; Макрыгина, Федоров, 2013; Fedorov et al., 2019).

Изучение геохимии кварцитов иркутской свиты показало их уникальную химическую чистоту. Осветление и перекристаллизация кварцитов приводят к существенной очистке пород вплоть до образования суперкварцитов, отвечающих требованиям оптического производства после обогащения. Найдены сливные кварциты, которые исходно близки по чистоте суперкварцитам, что существенно увеличивает прогнозные запасы кварцевого сырья. Выявление загрязнения примесями приконтактных кварцитов позволяет отделить их от продуктивной пачки.

### Заключение

Проведен комплекс работ по типизации и определению структурного положения перспективных на кварцевое сырье кварцитов иркутской свиты Восточного Саяна, определены их петрографические особенности, а главное, геохимическая чистота отдельных разновидностей кварцитов и их перспективы для дальнейшего производства. Для увеличения прогнозных ресурсов и запасов высокочистых разновидностей кварцитов региона необходимо проведение планомерного обследования, опробования и анализа участков иркутской свиты с учетом предложенных критериев оценки:

1. оконтуривание выходов осветленных кварцитов и их прослеживание на глубину;
2. опробование сливных кварцитов, которые по своей исходной чистоте могут значительно расширить прогнозные ресурсы кварцевого сырья;
3. геохимическое опробование всех выходов кремнистых пород иркутской свиты.

В результате изучения кварцитовых толщ в пределах Ока-Урикского и Урдагарганского узлов, а также на площади распространения исходных слабо метаморфизованных кварцитов Уренгенурского узла можно сделать следующие выводы.

1. В зависимости от содержания элементов-примесей в кварцитах возможно расширить области их применения от сырья для получения кристаллического кремния (все выявленные продуктивные разновидности кварцитов) до кварцевых концентратов для изготовления оптического кварцевого стекла (сливные и суперкварциты).

2. Определены факторы контроля продуктивных тел высокочистых кварцитов Восточного Саяна для прогнозирования их развития на глубину и выделения перспективных блоков:

- Формирование тел высокочистых кварцитов происходит в пределах иркутской кремнисто-карбонатной свиты среднерифейского возраста, испытавшей метаморфизм зеленосланцевой фации.
- Субстратом для тел высокочистых кварцитов являются темно-серые и серые микро- тонкозернистые кварциты с редкими и маломощными прослоями и линзами карбонатов;
- Тела осветленных кварцитов формируются в результате динамической перекристаллизации, связанной с деформацией более устойчивых, по сравнению с пластичными карбонатами, исходных микрокварцитов. Перекристаллизация вызвана коллизией Дунжугурской островной дуги с окраиной Гарганского микроконтинента.

Все типы кварцитов у контактов с интрузивными породами испытывают интенсивное заражение петрогенными и редкими элементами, которое характеризуется увеличением их содержания до 2 порядков по сравнению с неизменными.

Осветленные и перекристаллизованные продуктивные тела мощностью до первых десятков метров имеют пологое залегание и могут формироваться не только в верхней, но и в нижележащих частях пачки темно-серых мелкозернистых кварцитов, что связано с особенностями тектонических деформаций. Мощность максимально переработанных суперкварцитов может достигать первых метров, а для осветленных разновидностей – десятков метров.

Предварительная оценка ресурсов западной части Восточносаянского кварцитоносного района составляет порядка 134 млн т кварцитов для металлургии кремния и получения оптического кварцевого стекла.

### Финансирование/Благодарности

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту № 0284-2021-0004 с использованием оборудования и методик ЦКП «Изоотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН».

Авторы выражают глубокую признательность анонимным рецензентам за неравнодушное и внимательное отношение к нашей работе и за ценные замечания, которые позволили ее улучшить.

### Литература

- Ананьева Л.Г., Коровкин М.В. (2003). Минералого-геохимическое изучение кварцитов Антоновской группы месторождений. *Известия Томского политехнического университета*, 306(3), с. 50–55.
- Анисимова И.В., Левицкий И.В., Котов А.Б. и др. (2009). Возраст фундамента Гарганского блока в Восточном Саяне: результаты изучения U-Pb геохронологии. Труды IV Российской конференции «Изоотопная геохронология», Санкт-Петербург, ИПГГ РАН, с. 35–36.
- Ауржанаева Д.Ц., Федоров А.М., Мазукабзов А.М., Непомнящих А.И., Очирова Э.А., Посохов В.Ф. (2020). Механизмы формирования химически чистых кварцитов Бурал-Сардыкского месторождения. *Геология и геофизика*, 61 (10), с. 1316–1330.
- Волкова М.Г., Непомнящих А.И., Федоров А.М. (2019). Флюидные включения в «сливном» кварце Ока-Урикского блока (Восточный Саян). *Записки Российской минералогического общества*, 148(3), с. 94–101.
- Волкова М.Г., Непомнящих А.И., Федоров А.М., Махлянова А.М., Брянский Н.В. (2017). Флюидные включения в «суперкварцитах» месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян). *Геология и геофизика*, 58 (9), с. 1324–1331.
- Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И. (2003). Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия). *Доклады академии наук*, 390(2), с. 219–223.

Геолого-геохимические исследования кварцевого сырья месторождения Бурал-Сарьдаг. (2001). Науч. рук. А.И. Непомнящих. Иркутск.

Кузнецов А.Б., Летникова Е.Ф., Вишневецкая И.А., Константинова Г.В., Кутявин Э.П., Гелетий Н.К. (2010). Sr-хемостратиграфия карбонатных отложений осадочного чехла Тувино-Монгольского микроконтинента. *Доклады академии наук*, 432(3), с. 350–355.

Кузьмичев А.Б. (2004). Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. Москва: ПРОБЕЛ-2000, с. 192.

Макрыгина В.А. Федоров А.М. (2013). Преобразование кварцитов как следствие поздних тектонических событий в развитии Чуйской и Гарганской глыб. *Геология и геофизика*, 54(12), с. 1861–1870.

Малышев А.Г. и др. (1988). Изучить основные кварцевые проявления Южной части Прибайкальской провинции на высококачественный гранулированный и прозрачный кварц для плавки и горный хрусталь. Отчет. Александров.

Мазукабзов А.М., Фёдоров А.М., Непомнящих А.И. (2020). Структура месторождения суперкварцитов Бурал-Сардык (Восточный Саян). *Геодинамика и Тектонофизика*, 22(2), с. 244–261.

Непомнящих А.И., Волкова М.Г., Жабоедов А.П., Федоров А.М. (2018). Кварцевые концентраты на основе сливного кварцита. *Неорганические материалы*, 54(8), с. 850–853.

Непомнящих А.И., Демина Т.В., Жабоедов А.П., Елисеев И.А., Лесников А.К., Лесников П.А., Паклин А.С., Романов В.С. и др. (2017). Оптическое кварцевое стекло на основе суперкварцитов Восточных Саян. *Физика и химия стекла*, 43(3), с. 288–295.

Непомнящих А.И., Жабоедов А.П., Волкова М.Г., Федоров А.М., Яшин В.Н. (2019). Комбинированная технология обогащения кварцитов Восточного Саяна. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 3, с. 113–121.

Петрова З.И., Конева А.А., Макрыгина В.А. (1995). Геохимия кварцитов и кварцитосланцев Приольхонья и о. Ольхон (Западное Прибайкалье). *Геохимия*, 10, с. 1448–1464.

Поисковые работы на кварцевое сырье в юго-восточной части Восточного Саяна. (2006). Отчет ОАО «ВЗПК» о результатах поисковых работ на кварцевое сырье, проведенных в 2001–2005 гг. Отв. исп. В.Н. Яшин. Улан-Удэ.

Рогачев А.М. и др. (1991). Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Дибь-Ока-Урик. Отчет Верхнеокинской партии о результатах ГДП за 1984–90 гг. ТФИ по РБ.

Рошкетав П.А. и др. (1976). Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов р.р. Урдо-Боксона и Хоре (Вост. Саян). Отчет о работах Бутугольской ПСП за 1973–1976 гг. Улан-Удэ: ТФИ по РБ.

Технические условия «Кварцевые концентраты из природного кварцевого сырья для наплава кварцевых стекол». (1997). ТУ 5726-002-11496665-97. Москва.

Федоров А.М., Макрыгина В.А., Будяк А.Е., Непомнящих А.И. (2012). Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян). *Доклады академии наук*, 442(2), с. 244–249.

Федоров А.М., Спиридонов А.М., Будяк А.Е., Сокольникова Ю.В., Куликова З.И. (2011). Условия формирования месторождения сверхчистых кварцитов Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН*, 38(1), с. 94–104.

Царев Д.И., Хрусталев В.К., Гальченко В.К., Аюджанаева Д.Ц. (2007). Геология и генезис Черемшанского месторождения кремнеземного сырья (Западное Забайкалье, Россия). *Геология рудных месторождений*, 49(4), с. 334–345.

Чередниченко А.И. (1964). Тектонофизические условия минеральных преобразований в твердых горных породах. Киев: Наукова думка, 184 с.

Götze, J., Möckel, R., (eds.). (2012). Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer Geology. Springer, Berlin: Germany, 360 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3>

Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomnyashchikh A.I., Zhaboedov A.P., Parshin A.V., Posokhov V.F., Sokolnikova Yu.V. (2019). Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia. *Acta Geochimica*, 38(1), pp. 22–39. <https://doi.org/10.1007/s11631-018-0268-5>

Müller A., Ihlen P.M., Wanvik J.E., Flem B. (2007). High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. *Mineralium Deposita*, 42, pp. 523–535. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0124-8>

## Сведения об авторах

*Александр Михайлович Федоров* – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а

*Валентина Алексеевна Макрыгина* – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а

*Анатолий Муталибович Мазукабзов* – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128

*Александр Иосифович Непомнящих* – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а

*Дулмажан Цыденешиевна Аюджанаева* – кандидат геол.-мин. наук, научный сотрудник Геологического института СО РАН

Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6а

*Мария Геннадьевна Волкова* – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а

Статья поступила в редакцию 20.08.2020;

Принята к публикации 15.09.2021; Опубликована 30.11.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

## Resources of quartz raw materials, Gargan block, East Sayan quartzite-bearing area

A.M. Fedorov<sup>1\*</sup>, V.A. Makrygina<sup>1</sup>, A.M. Mazukabzov<sup>2</sup>, A.I. Nepomnyashchikh<sup>1</sup>, D.Ts. Ayurzhanaeva<sup>3</sup>, M.G. Volkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

\*Corresponding author: Alexander M. Fedorov, e-mail: sashaf@igc.irk.ru

**Abstract.** The evaluation (according to structural and geochemical rock properties) of the quartzites from the East Sayan quartzite-bearing area as a potential source of quartz raw material for crystalline silicon and optical glass manufacturing can significantly expand the forecast resources of this type of raw materials. The geological structure of the Irkut Formation, productive of high-purity quartzites is specified within the Oka-Urik, Urengur

and Urdagargan quartz-bearing areas; geological, mineralogical-petrographic and geochemical characteristics of the main quartzite types are given, the main morphological features of productive high-purity quartzite bodies are specified to predict their occurrence at depth. The major factors in the formation of high-purity quartzite bodies include: 1) quartzites are accumulated in the siliceous-carbonate sequence of the Middle Riphean Irkut Formation within a

broad but isolated basin; 2) high-purity quartzite bodies are produced as a result of dynamic recrystallization due to the deformation of primary microquartzites resulting from the collision of the Dunzhugar island arc with the Gargan microcontinent margin. Within the western part of the East-Sayan quartz-bearing area, quartzite reserves as a potential source for silicon metallurgy and production of optical glass were estimated as 134 mln tons.

**Keywords:** quartzites, superquartzites, geochemistry, recrystallization, quartz raw materials reserves, Eastern Sayan

#### Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment project No. 0284-2021-0004 using the equipment and methods of the Center for Collective Use «Isotope-Geochemical Research» of the IGC SB RAS.

The authors are grateful to the anonymous reviewers for their caring and attentive attitude to our work and for valuable comments that allowed us to improve it.

**Recommended citation:** Fedorov A.M., Makrygina V.A., Mazukabzov A.M., Nepomnyashchikh A.I., Ayurzhanava D.Ts., Volkova M.G. (2021). Resources of quartz raw materials, Gargan block, East Sayan quartzite-bearing area. *Georesursy = Georesources*, 23(4), pp. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.11>

#### References

- Anan'eva L.G., Korovkin M.V. (2003). Mineralogical and geochemical study of quartzites of the Antonovka deposit group. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 306(3), pp. 50–55 (In Russ.)
- Anisimova I.V., Levitsky I.V., Kotov A.B. et al. (2009). The age of the basement of the Gargan block, Eastern Sayan: the results of U-Pb geochronology. *Proc. IV Russ. Conf.: Isotope Geochronology*, St. Petersburg, IOGP RAS, pp. 35–36. (In Russ.)
- Ayurzhanava D.Ts., Fedorov A.M., Mazukabzov A.M., Nepomnyashchikh A.I. et al. (2020). Mechanisms of high-purity quartzite formation at the Bural-Sardyk Deposit (Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 61(10), pp. 1075–1087. <https://doi.org/10.15372/RGG2020106>
- Cherednichenko A.I. (1964). Tectonophysical conditions of mineral transformations in solid rocks. Kiev: Naukova dumka, 184 pp. (In Russ.)
- Fedorov A.M., Spiridonov A.M., Budyak A.E., Sokolnikova Y.V., Kulikova Z.I. (2011). Conditions for the formation of the Bural-Sardag deposit of superpure quartzites (Eastern Sayan). *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*, 38(1), pp. 94–104. (In Russ.)
- Fedorov A.M., Makrygina V.A., Budyak A.E., Nepomnyashchikh A.I. (2012). New data on the geochemistry and mechanism of formation of quartzites of the Bural-Sar'dag deposit (Eastern Sayan Mountains). *Dokl. Earth Sci.*, 442(1), pp. 120–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X12010126>
- Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomnyashchikh A.I., Zhaboedov A.P., Parshin A.V., Posokhov V.F., Sokolnikova Yu.V. (2019). Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia. *Acta Geochimica*, 38(1), pp. 22–39. <https://doi.org/10.1007/s11631-018-0268-5>
- Geological and geochemical studies of quartz raw materials of the Bural-Sardag deposit. (2001). Sci. director A.I. Nepomnyashchikh. Irkutsk. (In Russ.)
- Götze, J., Möckel, R., (eds.). (2012). Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer Geology. Springer, Berlin: Germany, 360 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3>
- Kuzmichev A.B. (2004). Tectonic history of the Tuva-Mongolian massif: Early Baikal, Late Baikal and Early Caledonian stages. Moscow: Probel-2000, 192 p. (In Russ.)
- Kuznetsov A.B., Konstantinova G.V., Kutyavin E.P., Letnikova E.F., Vishnevskaya I.A., Geletii N.K. (2010). Sr-chemostratigraphy of carbonate sedimentary cover of the Tuva-Mongolian microcontinent. *Dokl. Earth Sci.*, 432(1), pp. 577–582. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10050065>
- Makrygina V.A., Fedorov A.M. (2013). Quartzite transformation as a consequence of late tectonic events in the evolution of the Chuya and Gargan blocks. *Russian Geology and Geophysics*, 54(12), pp. 1450–1457. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.014>
- Malyshev A.G. et al. (1988). To study the main quartz occurrences of the Southern part of the Baikal province for high-quality granular and transparent quartz for melting and rock crystal. Report. Alexandrov (In Russ.)
- Mazukabzov A.M., Fedorov A.M., Nepomnyashchikh A.I. (2020). Structure of the Bural-Sardyk superquartzite deposit (East Sayan Mountains). *Geodynamics and Tectonophysics*, 11(2), pp. 244–261. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0472>
- Müller A., Ihlen P.M., Wanvik J.E., Flem B. (2007). High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. *Mineralium Deposita*, 42, pp. 523–535. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0124-8>
- Nepomnyashchikh A.I., Demina T.V., Zhaboedov A.P., Eliseev I.A., Lesnikov A.K. et al. (2017). Optical silica glass based on super quartzites from the Eastern Sayan Mountains. *Glass Physics and Chemistry*, 43(3), pp. 222–226. <https://doi.org/10.1134/S1087659617030099>
- Nepomnyashchikh A.I., Volkova M.G., Zhaboedov A.P., Fedorov A.M. (2018). Quartz concentrates based on compact quartzite. *Inorganic Materials*, 54(8), pp. 805–808. <https://doi.org/10.1134/S0020168518080137>
- Nepomnyashchikh, A.I., Zhaboedov, A.P., Volkova, M.G. et al. (2019). Dressing Technology for the East Sayan Quartzites. *J Min Sci*, 55, pp. 444–451. <https://doi.org/10.1134/S1062739119035782>
- Petrova Z.I., Koneva A.A., Makrygina V.A. (1996). Geochemistry of quartzites and quartzitochists of the Olhon region (Western Baikal area). *Geochemistry International*, 33(9), pp. 109–127.
- Prospecting of quartz raw materials in the southeastern part of the Eastern Sayan Mountains. (2006). Report. Ed. V.N. Yashin. Ulan-Ude. (In Russ.)
- Rogachev A.M. et al. (1991). Geological structure and minerals of the Dibi-Oka-Urik interfluv. Report. (In Russ.)
- Roshchektaev P.A. et al. (1976). Geological structure and minerals of the basins of the Urdo-Boxon and Khore rivers (East. Sayan Mountains). Report. Ulan-Ude. (In Russ.)
- Technical Specifications “Quartz concentrates from natural quartz raw materials for quartz glasses”. (1997). TS 5726-002-11496665-97. Moscow. (In Russ.)
- Tsarev D.I., Khrustalev V.K., Galchenko V.K., Ayurzhanava D.Ts. (2007). Geology and genesis of the Cheremshanka silica deposit, western Transbaikal Region, Russia. *Geology of ore deposits*, 49(4), pp. 297–305. <https://doi.org/10.1134/S1075701507040046>
- Volkova M.G., Nepomnyashchikh A.I., Fedorov A.M., Makhlyanova A.M., Bryanskii N.V. (2017). Fluid inclusions in “Superquartzites” of the Byral-Sardyk deposit (East Sayan). *Russian Geology and Geophysics*, 58(9), pp. 1053–1058. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.12.007>
- Volkova M.G., Nepomnyashchikh A.I., Fedorov A.M. (2019). Fluid inclusions in “compact” quartz from the Oka-Urik block (the East Sayan). *Zapiski RMO = Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 148(3), pp. 94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1483.07>
- Vorob'ev E.I., Spiridonov A.M., Nepomnyashchikh A.I., Kuzmin M.I. (2003). Superpure quartzites of the eastern Sayan (Buryat Republic, Russia). *Dokl. Earth Sci.*, 390(4), pp. 497–500. (In Russ.)

#### About the Authors

*Alexander M. Fedorov* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1a Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russian Federation

*Valentina A. Makrygina* – DSc (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1a Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russian Federation

*Anatoly M. Mazukabzov* – DSc (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

128 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russian Federation

*Alexander I. Nepomnyashchikh* – DSc (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1a Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russian Federation

*Dulmazhap Ts. Ayurzhanava* – PhD (Geology and Mineralogy), Researcher, Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

6a Sakh'yanova st., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

*Mariya G. Volkova* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1a Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russian Federation

Manuscript received 20 August 2020;

Accepted 15 September 2021; Published 30 November 2021