

Высокоочищенные кварцевые концентраты. Применение в высокотехнологичной промышленности, современные требования к параметрам качества

Леонид Вадимович КУЗЬМИН

АО «Кыштымский ГОК», Челябинская область, Россия

Аннотация

Актуальность. Высокоочищенные кварцевые концентраты (ВЧК) являются одним из базовых материалов для целого ряда направлений промышленности высоких технологий. В современных условиях, когда одной из задач развития страны является импортозамещение и развитие собственной hi-tech промышленности, насущным вопросом является определение потенциальных направлений их использования с пониманием критериев качества, предъявляемых со стороны мировой высокотехнологичной индустрии.

Цель работы. В статье рассмотрены основные области применения ВЧК с учетом вновь возникающих направлений их использования. Проанализированы основные критерии и параметры качества ВЧК на примере ведущих мировых производителей, в том числе и компании «Русский кварц».

Методология. На основании литературных источников и данных производителей ВЧК произведен анализ качественных характеристик сортов ВЧК трех ведущих мировых производителей в разрезе отраслей применения.

Результаты. Определены основные критерии качества ВЧК по параметрам химической чистоты, газо-жидких и инородных включений. Указаны особенности применения различных сортов ВЧК в различных отраслях hi-tech индустрии в зависимости от содержания отдельных элементов-примесей и проведено сравнение российских сортов ВЧК с аналогами зарубежных производителей.

Выводы. Производимые в РФ высокоочищенные кварцевые концентраты соответствуют критериям качества, предъявляемым мировой hi-tech индустрией ко всем параметрам качества, в том числе и со стороны полупроводниковой промышленности. При этом постоянное ужесточение требований со стороны потребителей и вновь открывающиеся направления использования, увеличивающие объем потребления ВЧК, требуют дополнительного исследования сырьевой базы ВЧК с целью ее расширения как в количественном, так и в качественном выражении.

Ключевые слова: высокоочищенные кварцевые концентраты, высокоочищенный кварц, применение в промышленности, параметры качества, hi-tech, месторождение, производители, высокотехнологичная промышленность.

Введение

Кварц является одним из самых широко распространенных минералов на Земле. Он применяется в стекольной, строительной, металлургической и многих других отраслях промышленности. Отдельные месторождения кварца имеют запасы, исчисляемые десятками миллионов тонн кварцевой руды.

При этом лишь очень немногие месторождения подходят по объему, качеству и пригодности для производства высокоочищенных кварцевых концентратов (ВЧК). В зарубежной терминологии ВЧК принято обозначать как HPQ (High Purity Quartz). Этот термин (ВЧК/HPQ) относится только к кварцевым концентратам, получаемым при непосредственном обогащении природной кварцевой руды, и не относится к другим разновидностям высокоочищенного кварца, например, к искусственным кристаллам кварца (ИКК), получаемым методом гидротермального выращивания.

Несмотря на широкое распространение источников кварцевого сырья различного генезиса (кварцевые пе-

ски, жильный кварц, кварциты, пегматиты, аляскитовые граниты и т. д.), требования к качеству кварца, используемого для производства ВЧК, резко ограничивают возможные варианты сырьевых источников. В мире известно только два месторождения, объекты которых полностью сертифицированы потребителями для использования во всех областях применения ВЧК, включая полупроводниковую промышленность. Это месторождение Spruce Pine, США (пегматиты и аляскитовые граниты) [1] и Кыштымское месторождение, Россия (жильный гранулированный кварц) [2].

Такое малое количество сертифицированных месторождений обусловлено очень высокими специфическими требованиями со стороны современной hi-tech промышленности к характеристикам ВЧК.

Кроме того, находясь на стыке традиционных горно-обогатительных производств с их тенденцией к массовому производству с переработкой сырья и выпуском продукции в объеме сотен тысяч тонн в месяц, с одной

стороны, и высокотехнологичной промышленности с требованиями к чистоте продукции, исчисляемой в единицах частиц загрязнения на миллиард, с другой, производство ВЧК является очень специфическим, имеющим мало аналогов в мировой промышленности.

Результаты

Уникальные свойства кварцевого стекла и изделий, производимых из ВЧК (высокая химическая чистота, светопропускание в ультрафиолетовой части спектра, термостабильность и пр.) делают ВЧК одним из так называемых «базовых» материалов для целого ряда высокотехнологичных производств – полупроводники, «солнечная» энергетика, специальная высокочистая оптика и светотехника, аэрокосмические технологии и телекоммуникации. В частности, 95 % мирового объема монокристаллов кремния выращивается по методу Чохральского [3], в том числе и полупроводникового качества. При этом рост кристаллов происходит в кварцевых тиглях, в производстве которых ВЧК являются на сегодняшний день безальтернативным вариантом, а значит, ВЧК участвуют в изготовлении практически каждого микроэлектронного устройства в мире, начиная с простейшего калькулятора и заканчивая суперкомпьютерами.

На протяжении долгого периода традиционными сферами применения ВЧК [4] являются:

- в полупроводниковой промышленности – внешний (непрозрачный) и средний (прозрачный) слои трехслойных кварцевых тиглей полупроводникового качества для выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского; оснастка, используемая в процессе изготовления и обработки кремниевых пластин полупроводникового качества (кварцевые реакторы, кассеты, трубы, стержни, пластины);

- в фотовольтаике – внешний (непрозрачный) и внутренний (прозрачный) слои двуслойных кварцевых тиглей «солнечного» качества для выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского; оснастка, используемая в процессе изготовления и обработки кремниевых пластин «солнечного» качества (кварцевые реакторы, кассеты, трубы, стержни, пластины);

- в светотехнике – ультрафиолетовые, галогенные и высокотемпературные лампы;

- в оптической промышленности – излучатели для микролитографии, оптика для эксимерных лазеров, зеркала оптических телескопов и многое другое;

- в оптоволоконной промышленности – защитная оболочка оптического волокна, изготавливаемого по APVD процессу;

- в микроэлектронике – наполнитель для EMC-компаньонов.

Различные области применения определяют ряд сортов ВЧК, выпускаемых производителями в зависимости от требуемых параметров качества и цены (табл. 1).

В отдельную категорию можно выделить производства нового поколения высокочистых материалов, использующих высокую химическую чистоту ВЧК. В частности, ВЧК с низким содержанием титана и алюминия используются для производства методом карботермического восстановления карбида кремния полупроводникового качества, применяемого в силовой микроэлектронике, и карбида кремния улучшенного качества различного применения [5].

С учетом подобного спектра применения и редкости нахождения особо чистое кварцевое сырье, используемое для выпуска ВЧК, включено в РФ в список стратегических видов полезных ископаемых.

Существует три основных критерия качества и чистоты ВЧК:

1. Химический состав. В зависимости от направления применения потребители предъявляют различные требования к химической чистоте ВЧК, но в целом текущие стандарты качества говорят о том, что общее содержание нормируемых элементов-примесей в ВЧК не должно превышать 20 ppm [6]. При этом некоторые отрасли лимитируют содержание отдельных элементов в ВЧК в очень ограниченных пределах – например, содержание железа в ВЧК, используемых в фотовольтаике, не должно превышать 0,5 ppm, а содержание бора и фосфора – не более 0,1 ppm. Для полупроводниковой промышленности содержание железа должно быть не более 0,2 ppm, а содержание меди, хрома и никеля для наиболее критичных приложений в полупроводниковой промышленности должно быть не более 0,005 ppm по каждому из этих элементов, а содержание урана и тория не должно превышать уровня 0,5 ppb.

Таблица 1. Сорта ВЧК мировых производителей, применяемые в различных областях hi-tech индустрии
Table 1. Varieties of HPQC of world manufacturers used in various areas of the hi-tech industry

| Область применения | Производитель/сорт ВЧК | | |
|----------------------------------|--|----------------------------------|---------------------|
| | Sibelco | The Quartz Corp. | Русский кварц |
| Полупроводниковая промышленность | IOTA STD-SV, IOTA 4, IOTA 6-SV, IOTA 8 | NC4A, NC4X, NC4XF | RQ-2K, RQ-1K |
| Светотехника и оптика | IOTA STD, IOTA 4, IOTA 6, IOTA CG | NC4A, NC4X, Q4DH | RQ-3K, RQ-2K, RQ-1K |
| Фотовольтаика | IOTA 4, IOTA 6, IOTA CG | NC4A, NC4A-CG, NC4AF, Q4DH, NC4X | RQ-2K |
| Оптоволоконная промышленность | IOTA 6-SV, IOTA 8 | NC4XF | RQ-1K |
| Микроэлектроника | – | NC1-LA5, NC1-LA12, NC1-LA20 | – |

Таблица 2. Типичные содержания элементов-примесей в наиболее используемых сортах ВЧК (в ppm)
Table 2. Typical contents of impurity elements in the most used varieties of HPQC (in ppm)

| Элемент | Производитель | | | | | |
|---------|---------------|-----------|----------------------|---------|------------------------|--------|
| | Sibelco (США) | | «Русский кварц» (РФ) | | The Quartz Corp. (США) | |
| | IOTA STD | IOTA 6-SV | RQ-2K | RQ-1K | NC4A | NC4X |
| Al | 14 | 8 | 3,9 | 3,6 | 13 | 13 |
| B | < 0,10 | < 0,05 | 0,07 | 0,07 | < 0,1 | < 0,1 |
| Ca | 0,3 | 0,5 | 0,12 | 0,1 | 0,5 | 0,5 |
| Cr | 0,006 | 0,002 | < 0,01 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,01 |
| Cu | 0,028 | 0,001 | < 0,010 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,01 |
| Fe | 0,3 | 0,1 | 0,20 | 0,05 | 0,2 | 0,1 |
| K | 0,7 | < 0,1 | 0,13 | 0,03 | 0,5 | 0,11 |
| Li | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,29 | 0,4 | 0,4 |
| Mg | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | < 0,1 | < 0,1 |
| Mn | 0,039 | 0,004 | 0,004 | < 0,001 | < 0,1 | < 0,05 |
| Na | 1,0 | < 0,05 | 0,30 | 0,05 | 0,8 | 0,05 |
| Ni | 0,001 | 0,001 | < 0,01 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,01 |
| Ti | 1,2 | 1,3 | 2,9 | 2,9 | 1,2 | 1,2 |

Исторически сложилось так, что мировым стандартом качества являются марки IOTA производства компании UNIMIN (в настоящее время – компания Sibelco), химический состав которых определяется химическим составом кварцевой руды месторождения Spruce Pine (США) [7].

Такая ситуация затрудняет вывод на рынок и сертификацию ВЧК из новых объектов, поскольку природный кварц из различных месторождений имеет уникальный химический состав и распределение элементов-примесей, что, как правило, не позволяет ему попасть точно в рамки таких спецификаций.

Однако в данный момент потребители высокочистого кварца проявляют большую гибкость в определении требований к химическому составу ВЧК в зависимости от отрасли. Например, содержание титана важно для УФ-применений, поскольку титан значительно снижает светопропускание в ультрафиолетовом диапазоне. Этот фактор не критичен для фотовольтаики и полупроводниковой промышленности. В то же время содержания таких элементов-примесей, как натрий, калий, бор, фосфор (целевое содержание менее 0,1 ppm), медь, хром и никель (целевое содержание менее 0,005 ppm) имеют важное значение для полупроводниковой промышленности, но не являются существенным для светотехники.

Типичные значения содержания элементов-примесей в наиболее часто используемых сортах ВЧК, поставляемых основными мировыми производителями (Sibelco (США) [8], The Quartz Corp. (США) [9], «Русский кварц» (РФ) [10]) приведены в табл. 2.

2. Газово-жидкие включения (ГЖВ). Наличие газово-жидких включений в зернах природного кварца определяет качество получаемого из ВЧК кварцевого стекла и является таким же важнейшим параметром, как и химическая чистота кварца. От ГЖВ зависит целый ряд технологических свойств ВЧК: потери при прокаливании, светопропускание, скорость кристаболитизации [11]. В связи с высокой вязкостью кварцевого стекла ГЖВ наследуемые из зерен ВЧК не имеют возможности выйти из распла-

вленной стекломассы и приводят к появлению дефектов стекла в виде пузырей и капилляров, вплоть до полной непрозрачности получаемого стекла. Содержание в стекле таких дефектов жестко нормируется (табл. 3).

В отечественной практике для измерения содержания ГЖВ в кварце используется очень эффективный метод измерения коэффициента светопропускания (Т, %) в иммерсионной жидкости (Методика ГосНИИКС ТУ 21-РСФСР-790-80). Коэффициент светопропускания ВЧК должен быть не менее 80 % согласно российским ТУ 5726-002-11496665-97 [12]. Для примера: коэффициент светопропускания кварца используемых кварцевых объектов из месторождений Spruce Pine и Кыштымского месторождения находится в диапазоне 85–88 % [13].

3. Инородные включения. Инородные включения (общепринято обозначать их как «черные» и «белые» точки) в ВЧК могут определяться как остатками минеральных примесей, не удаленных в процессе обогащения кварцевой руды, так и технологическим загрязнением в процессе выпуска продукции [15]. Как правило, очень малое количество таких примесей (в частности, в полупроводниковой отрасли при изготовлении блоков из кварцевого стекла допускается не больше одной инородной частицы размером более 1 мм на 20 кг стекла) не позволяет уверенно определять их путем химического анализа, поэтому результат оценивается только непосредственно после выплавки кварцевого стекла по количеству и размеру включений на изделии (табл. 4) либо определенный вес кварцевого стекла.

В зависимости от области применения содержание дефектов (количество и размер пузырьков, капилляров) в кварцевом стекле, связанных с ГЖВ и инородными включениями, определяется как отраслевыми стандартами, так и требованиями отдельных потребителей ВЧК, как правило, являющимися коммерческой тайной.

Заключение

Необходимо отметить, что в настоящее время в связи с развитием мировой высокотехнологической индустрии возникает все больше областей применения

Таблица 3. Пример требований к содержанию пузырьков в кварцевых тиглях для фотовольтаики, изготовленных из ВЧК согласно Стандарту Китайской ассоциации производителей электронных материалов [14]**Table 3. Example of requirements for the content of bubbles in quartz crucibles for photovoltaics made from HPQC according to the Standard of the China Association of Electronic Materials Manufacturers [14]**

Ед. измерения: мм

| Наименование дефекта | Расположение | Требования (шт. на 1 тигель), размер тигля | | |
|--|--|--|--|---|
| | | $D \leq 22''$ | $D > 22''$ | |
| Пузырьки | Внутри стенок тигля | $\varnothing > 2,5$ не допускаются | $\varnothing > 2,5$ не допускаются | |
| | | $2,0 < \varnothing \leq 2,5 \leq 2$ шт. | $2,0 < \varnothing \leq 2,5 \leq 3$ шт. | |
| | | $1,5 < \varnothing \leq 2,0 \leq 3$ шт. | $1,5 < \varnothing \leq 2,0 \leq 5$ шт. | |
| | | $1,0 < \varnothing \leq 1,5 \leq 5$ шт. | $1,0 < \varnothing \leq 1,5 \leq 10$ шт. | |
| | | $0,5 < \varnothing \leq 1,0 \leq 10$ шт. | $0,5 < \varnothing \leq 1,0 \leq 12$ шт. | |
| | | $\varnothing \leq 0,5$, см. п.5.2.2 | $\varnothing \leq 0,5$, см. п.5.2.2 | |
| Не допускается наличие открытых пузырьков и выпуклостей, вызванных пузырьком | | | | |
| Пузырьковые кластеры | Гладкая внутренняя поверхность тигля | Внутри стенок тигля | $\varnothing > 2,5$ не допускаются | $\varnothing > 3,0$ не допускаются |
| | | | $2,0 < \varnothing \leq 2,5 \leq 3$ шт. | $2,0 < \varnothing \leq 2,5 \leq 5$ шт. |
| | | | $1,0 < \varnothing \leq 2,0 \leq 5$ шт. | $1,0 < \varnothing \leq 2,0 \leq 8$ шт. |
| | | | $\varnothing \leq 1,0 \leq 8$ шт. | $\varnothing \leq 1,0 \leq 12$ шт. |
| | Площадь в пределах 300 мм ² | Внутри стенок тигля | Не должно превышать 2 шт. | |

Таблица 4. Пример требований к содержанию инородных включений в кварцевых тиглях для фотовольтаики, изготовленных из ВЧК согласно Стандарту Китайской ассоциации производителей электронных материалов [14]**Table 4. Example of the requirements for the content of foreign inclusions in quartz crucibles for photovoltaics made from HPQC according to the Standard of the China Association of Electronic Materials Manufacturers [14]**

Ед. измерения: мм

| Наименование дефекта | Расположение | Требования (шт. на 1 тигель), размер тигля | |
|---|------------------------------|--|---|
| | | $D \leq 22''$ | $D > 22''$ |
| Включения/загрязнения | Внутренняя поверхность тигля | $\varnothing > 1,5$ не допускаются | $\varnothing > 2,5$ не допускаются |
| | | $0,5 < \varnothing \leq 1,5 \leq 2$ шт. | $1,5 < \varnothing \leq 2,5 \leq 2$ шт. |
| | | $\varnothing \leq 0,5$ не учитывается | $0,5 < \varnothing \leq 1,5 \leq 4$ шт. |
| | Внутри стенок тигля | $\varnothing > 2,5$ не допускаются | $\varnothing > 3,0$ не допускаются |
| | | $2,0 < \varnothing \leq 2,5 \leq 2$ шт. | $2,0 < \varnothing \leq 3,0 \leq 3$ шт. |
| | | $1,5 < \varnothing \leq 2,0 \leq 3$ шт. | $1,5 < \varnothing \leq 2,0 \leq 5$ шт. |
| | | $0,5 < \varnothing \leq 1,5 \leq 5$ шт. | $0,5 < \varnothing \leq 1,5 \leq 8$ шт. |
| | | $\varnothing \leq 0,5$ не учитывается | $\varnothing \leq 0,5$ не учитывается |
| Допускается не больше двух длинных черных точек с размерами: длина ≤ 5 мм, $\leq 1,5$ мм | | | |

ВЧК, предъявляющих свои собственные запросы к качеству ВЧК и этим открывая новые возможности для вовлечения новых объектов и типов кварцевого сырья в промышленное использование. С другой стороны, требования к характеристикам ВЧК со стороны традиционных потребителей все более ужесточаются в связи с внедрением новых технологических процессов, что заставляет производителей совершенствовать свои технологии обогащения ВЧК. Поэтому текущие стандарты качества кварцевых концентратов не являются незы-

блемными и имеют постоянную тенденцию к снижению содержания элементов-примесей, находясь уже практически на пределе обогатимости используемых кварцевых руд. В связи с этим, а также принимая во внимание ограниченность в обозримом будущем сырьевой базы Кыштымского месторождения как единственного источника ВЧК, можно сделать вывод о целесообразности доизучения потенциальных источников высококачественного кварца в РФ с учетом современных требований к параметрам качества ВЧК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brobst D. A. Geology of the Spruce Pine District, Avery, Mitchell, and Yancey Counties North Carolina // Geological survey bulletin. Washington: U.S. Government Printing Office, 1962. Vol. 1122-A. 26 p. <https://doi.org/10.3133/b1122A>
2. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 269 с.

3. Большая российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/c/metod-chokhral-skogo-fa273d>
4. Бурьян Ю. И., Борисов Л. А., Красильников П. А. Кварцевое сырье – важнейший вид минеральных ресурсов для высокотехнологичных отраслей промышленности // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 9–12.
5. Абдюханов И. М. Разработка основ технологии производства металлургического кремния повышенной чистоты для наземной фотоэнергетики // Российский химический журнал (ЖРХО им. Д. И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 5-6. С. 107–111.
6. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics / ed. by J. Götze, R. Möckel. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 360 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3_4
7. Swanson S. E., Veal W. B. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA // Journal of Geosciences. 2010, Vol. 55. P. 27–42 <https://doi.org/10.3190/jgeosci.062>
8. Sibelco. High Purity Quartz. URL: <https://www.sibelco.com/materials/high-purity-quartz>
9. The Quartz Corp. High Purity Quartz. URL: <https://thequartzcorp.com/quartz/>
10. Русский кварц. Продукция. URL: <https://russianquartz.com/produksiya/>
11. Минералургия жильного кварца. Кыштымский горно-обогатительный комбинат; под ред. В. Г. Кузьмина, Б. Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
12. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Недосекова И. Л., Савичев А. Н. Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса. Екатеринбург: ИГГ РАН; УГГУ, 2016. 283 с.
13. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Савичев А. Н. Особо чистый кварц Уфалейского кварценозного района (Южный Урал) // Известия УГГУ. 2018. Вып. 1(49). С. 23–32. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32>
14. Китайская ассоциация производителей электронных материалов. Стандарт для PV тиглей, предназначенных для выращивания монокристаллов кремния. T/CEMIA 005-2018. 2018. <https://www.chinesestandard.net/PDF/BOOK.aspx/TCEMIA005-2018>
15. Кузьмина Н. И. Критерии определения пределов обогатимости различных природных типов кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 49–51.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2023 года

High purity quartz concentrates. Application in high-tech industry, modern requirements for quality parameters

Leonid Vadimovich KUZ'MIN

JSC "Kyshtymskiy GOK", Chelyabinsk region, Russia

Abstract

Relevance. High-purity quartz concentrates (HPQ) are one of the basic materials for a number of high-tech industries. In modern conditions, when one of the tasks of the country's development is import substitution and the development of its own hi-tech industry, an urgent issue is to identify potential areas for their use with an understanding of the quality criteria imposed by the global high-tech industry.

The purpose of the work. The article considers the main areas of application of the HPQ, taking into account the newly emerging areas of their use. The main criteria and parameters of the quality of HPQ are analyzed using the example of the world's leading manufacturers, including the Russian Quartz company.

Methodology. Based on literature sources and data from HPQ producers, an analysis was made of the qualitative characteristics of HPQC varieties of three leading world manufacturers in the context of application sectors.

Results. The main criteria for the quality of HPQ are determined by the parameters of chemical purity, gas-liquid and foreign inclusions. The features of the use of various varieties of HPQ in various branches of the hi-tech industry are indicated, depending on the content of individual impurity elements, and a comparison of Russian grades of HPQ with analogues of foreign manufacturers is carried out.

Conclusions. High-purity quartz concentrates produced in the Russian Federation meet the quality criteria set by the global hi-tech industry for all quality parameters, including those from the semiconductor industry. At the same time, the constant tightening of requirements on the part of consumers and the newly opened areas of use, increasing the volume of consumption of HPQ, require additional research into the raw material base of HPQ in order to expand it both in quantitative and qualitative terms.

Keywords: high-purity quartz concentrates, high-purity quartz, industrial application, quality parameters, hi-tech, deposit, manufacturers, high-tech industry.

REFERENCES

1. Brobst D. A. 1962, Geology of the Spruce Pine District, Avery, Mitchell, and Yancey Counties North Carolina. *Geological survey bulletin*, vol. 1122-A, 26 p. <https://doi.org/10.3133/b1122A>
2. Polenov Yu. A. 2008, Endogenous quartz-vein formations of the Urals. Yekaterinburg, 269 p. (In Russ.)
3. Great Russian Encyclopedia. (In Russ.) URL: <https://bigenc.ru/c/metod-chokhral-skogo-fa273d>
4. Buryan Yu. I., Borisov L. A., Krasilnikov P. A. 2007, Quartz raw materials are the most important type of mineral resources for high-tech industries. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 10, pp. 9–12. (In Russ.)
5. Abdyukhanov I. M. 2001, Development of the fundamentals of the technology for the production of high-purity metallurgical silicon for ground-based photovoltaics. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], vol. XLV, no. 5-6, pp. 107–111. (In Russ.)
6. Götz J., Möckel R. 2012, Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, 360 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3_4
7. Swanson S. E., Veal W. B. 2010, Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA. *Journal of Geosciences*, vol. 55, pp. 27–42. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.062>
8. Sibelco. High Purity Quartz. URL: <https://www.sibelco.com/materials/high-purity-quartz>
9. The Quartz Corp. High Purity Quartz. URL: <https://thequartzcorp.com/quartz/>
10. Russian quartz. Products. (In Russ.) URL: <https://russianquartz.com/produktsiya/>
11. Kuzmina V. G., Kravtsova B. N. 1990, Minerallurgy of vein quartz. Kyshtym Mining and Processing Plant. Moscow, 294 p. (In Russ.)
12. Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Nedosekova I. L., Savichev A. N. 2016, Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufaley metamorphic complex. Ekaterinburg, 283 p. (In Russ.)
13. Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Savichev A. N. 2018, Especially pure quartz of the Ufaley quartz-bearing region (Southern Urals). *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (49), pp. 23–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32>
14. China Electronic Material Manufacturers Association. Standard for PV crucibles for growing silicon single crystals, 2018. (In Russ.) <https://www.chinesestandard.net/PDF/BOOK.aspx/TCEMIA005-2018>
15. Kuzmina N. I. 2007, Criteria for determining the concentration limits of various natural types of quartz raw materials. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 10, pp. 49–51. (In Russ.)

The article was received on June 28, 2023