Технологические особенности открытой разработки высокочистого кварца

Кантемиров В. Д.¹, Титов Р. С.^{1*}, Яковлев А. М.¹, Козлова М. В.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: ukrigd15@mail.ru

Реферат

Введение. В настоящее время основным сырьем для получения прозрачного кварцевого стекла, незаменимого компонента в производстве монокристаллического кремния, является высокочистый кварцевый концентрат. Концентрат представляет собой продукт измельчения природного «чистого» кварца, прошедшего цикл механической и глубокой химической очистки, с размером частиц 0,1–0,3 мм и совокупным содержанием примесей не более 20–30 ppm. Однако в природе месторождения чистого кварца встречаются достаточно редко, поэтому каждое из таких разведанных месторождений имеет особое значение и подлежит обработке с минимальными потерями кварцевого сырья.

Цель работы. Разработка технических решений по обработке небольших жил высокочистого гранулированного кварца.

Методология. Выполнен анализ физико-механических свойств и горнотехнических условий разработки отдельных кварцевых жил Кыштымского месторождения. Разработаны технологические решения по обработке кварцевых жил открытым способом, позволяющие снизить степень переизмельчения кварца.

Результаты. Гранулированный кварц вследствие своей структуры обладает свойством «лавинообразного» разрушения на мелкие зерна. Тем самым значительно снижается выход кондиционной фракции –400...+20 мм, что в условиях небольших запасов кварца в жилах, в среднем 0,1–2 тыс. т, ставит вопрос о целесообразности и эффективности их разработки. Для повышения выхода кондиционных фракций кварцевого сырья предложена безвзрывная технология отбойки кварца с использованием навешиваемого на гидравлический экскаватор гидромолота в сочетании с предварительным обнажением кварцевой жилы от вмещающих пород с применением специальной технологии взрывания пород в приконтактной зоне «кварц–порода».

Выводы. Предложенные технические решения позволяют вовлечь в разработку небольшие кварцевые жилы гранулированного кварца высокой чистоты, обеспечат высокую производительность и эффективность горных работ без значительных потерь дефицитного сырья.

Ключевые слова: гранулированный кварц; кварцевое сырье; кварцевые жилы; технологии взрывания; отбойка кварца гидромолотом.

Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук. Тема 1. Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых (№ 0405-2019-0005).

Введение. Высокочистый кварцевый концентрат является сырьем для ряда высокотехнологичных отраслей инновационной экономики. Из него получают прозрачное кварцевое стекло, которое на сегодня является безальтернативным компонентом процесса производства монокристаллического кремния – базового материала для микроэлектронной индустрии и солнечной энергетики. Высокочистые кварцевые концентраты – продукт измельчения природного кварца, очищенный от минеральных и химических примесей, с размером частиц

100–300 микрон и совокупным содержанием примесей (массовая доля) не более 20–30 ppm (мг/кг).

Анализ и обсуждение. Месторождения чистого от примесей кварца встречаются в природе достаточно редко, поэтому каждое из разведанных месторождений имеет особое значение и подлежит обработке с минимальными потерями сырья. В России единственным предприятием, которое выпускает концентраты, близкие к международному стандарту IOTA, является АО «Кыштымский горно-обогатительный комбинат» который производит сорт SSQ-2-KC (аналог IOTA CG, IOTA std). Добыча кварцевого сырья в настоящее время ведется подземным способом с разработкой жилы № 175. Обогащение кварцевого сырья и реализацию продукции осуществляет дочерняя фирма ООО «Русский кварц». Кыштымское месторождение гранулированного кварца расположено в Кыштымском городском округе Челябинской области. Гранулированный кварц Кыштымского месторождения обладает незначительным количеством газово-жидких включений. Коэффициент светопропускания колеблется от 79 до 91 %, в среднем составляя 84 %, что является самым высоким показателем среди всех месторождений гранулированного кварца.

Рис. 1. Характерные геологические разрезы жил гранулированного кварца Кыштымского рудного поля, отрабатываемых выработками (траншеями):

а – до глубины 10 м; б – до глубины 30 м

Fig. 1. Typical geological profiles of granular quartz veins at Kyshtym deposit, mined by mine workings (trenches)

а – down to the depth of 10 m; б – down to the depth of 30 m

Помимо основной разрабатываемой жилы № 175, содержащей 88 % разведанных и утвержденных запасов гранулированного кварца, на территории Кыштымского рудного поля площадью 44,6 км² располагается еще 46 жил, большая часть которых пригодна для открытой разработки. Кварцевые жилы имеют линзовидную, веретенообразную и плитообразную формы неправильной конфигурации. Практически все жилы выходят на открытую поверхность (рис. 1). Размеры жил изменяются в широких пределах: по простиранию – от 12 до 380 м, по падению – от 12 до 60 м, мощность – от 0,5 до 7 м. Простирание кварцевых жил в целом отвечает общему юго-восточному простиранию структуры. Падение жил обычно восточное, углы падения изменяются от 20° до 70°–80°. Жильные тела залегают

согласно со сланцеватостью вмещающих пород или секут ее по падению и простиранию, азимутальное несогласие достигает 10° – 20° , угловое 40° – 50° . Склонение жил юго-восточное в интервале 10° – 40° . Площадь месторождения покрыта рыхлыми четвертичными отложениями и породами коры выветривания. Мощность колеблется от 0 до 14 м, составляя в среднем 1,5–3,0 м. Запасы кварца в жилах колеблются от нескольких сотен до нескольких тысяч тонн, жилы могут быть отработаны неглубокими выработками (траншеями глубиной до 10 м или карьерами глубиной до 30–40 м) [1–11].

Таблица 1. Физико-технические характеристики пород Кыштымского месторождения

Table 1. Physical and technical characteristics rock at the Kyshtym deposit

Наименование породы	Коэффициент крепости по М. М. Протодяконову	Категория крепости по ЕНВ	Коэффициент рыхления	Объемный вес, т/м ³
Слюдяно-кварцевые сланцы	7	10–14	1,3–1,5	2,0
Амфиболиты	9	11–15	1,6–1,7	2,7–3,0
Кварцевые жилы	10	14–17	1,5–1,7	2,5

Комплекс горных пород, слагающих месторождения гранулированного кварца, представляет собой разнообразную серию грунтов от суглинков, глин и продуктов выветривания, сланцев до крепких скальных пород ордовикского и протерозойского возраста. Зона выветривания обычно проявлена до глубины 3–6 м (редко до 15 м) и наблюдается чаще всего в слюдяно-кварцевых сланцах [1–11].

При выборе технологий разработки кварца необходимо учитывать его особые физико-механические свойства. Особенностью структурного строения гранулированного кварца является то, что он состоит из зерен (гранул) размером до 1–2 мм, скрепленных между собой в результате естественных геологических процессов. В результате слабой спайности зерен он подвержен «лавинообразному» разрушению на отдельности от сейсмического воздействия взрывной нагрузки при буровзрывных работах (БВР) [12–15], что способствует переизмельчению кварцевого сырья и значительному выходу некондиционных фракций. В соответствии с внутренним стандартом предприятия СТП КИ-01-08-09 кондиционным для последующей переработки является кварц фракции –400...+20 мм. Поэтому при добыче необходимо исключить производство БВР по кварцу и обеспечить структурную сохранность кварцевой жилы от воздействия деформационных нагрузок при подготовке вскрышных пород к выемке.

Вмещающими породами для жил гранулированного кварца Кыштымского месторождения являются преимущественно кристаллические сланцы слюдяно-кварцевого и гранат-слюдяно-кварцевого состава, амфиболиты, гранитогнейсы и биотит-амфиболовые гнейсы. Все другие разновидности (кварциты, серпентиниты и др.) распространены незначительно, и гранулированный кварц в них не наблюдается. В табл. 1 представлены физико-технические характеристики пород Кыштымского месторождения.

Результаты. С учетом изложенного предлагается отрабатывать жилы в основном неглубокими карьерами с четырехметровыми уступами, вскрытием траншеями внешнего заложения, с отработкой уступов продольными сквозными заходками, ширина рабочей площадки при этом нормируется в пределах 22 м (ширина транспортной бермы 8–12 м). На рис. 2 представлен план типового карьера для отработки кварцевой жилы с глубиной заложения до 30 м, всего может быть отработано 12–18 жил с общими запасами до 17 тыс. т и коэффициентом вскрыши 14,9–31,9 м³/т (средний по 12 жилам – 24,8 м³/т).

Разработку открытым способом отдельных жил Кыштымского месторождения гранулированного кварца предлагается вести с использованием следующих типов технологического горного оборудования производства РФ [16]:

– гусеничного экскаватора ЭО-5225 (обратная лопата, вместимость ковша 1,5 м³) (ОАО «ВЭКС», Воронежский экскаваторный завод, г. Воронеж) для выемки и погрузки в автосамосвалы горной массы из забоя;

Рис. 2. План и разрезы типового карьера по разработке кварцевой жилы с глубиной заложения до 30 м

Fig. 2. Plan and sections of a typical open pit developing 30 m deep quartz vein

– фронтального колесного погрузчика ПК-46 (вместимость ковша 2,4 м³) (Челябинский тракторный завод-УРАЛТРАК, г. Челябинск) для использования на вспомогательных работах, отгрузки из забоя, при сортировке кварца, погрузке кварца в автосамосвалы;

– бурового станка Буран-2А (ООО «Амурский металлист», г. Благовещенск), с пневмоударником DHD 3,5 для бурения взрывных скважин $D = 90-120$ мм, диаметр буровых коронок –120 мм (марка KQ 120-120) для чистой вскрыши и 90 мм (марка CIR90) для вскрыши вблизи рудного тела в скальных вскрышных породах;

– автосамосвалов КАМАЗ-65115-48 (А5) грузоподъемностью 15 т для транспортирования горной массы;

– бульдозера ЧЕТРА Т-20 (отвал SU, емкость отвала 11,9 м³) (ООО «ЧЕТРА», г. Чебоксары) для использования на вспомогательных работах в карьерах, на отвалах и складах.

Рис. 3. Конструкция скважинных зарядов в зоне контакта кварцевой жилы с породой
 Fig. 3. The structure of the downhole charges in the zone of quartz vein and rock contact

Для предотвращения переизмельчения кварца при БВР предлагается специальная технология, включая схему ведения взрывных работ в приконтактной зоне вскрышных пород с кварцем, основанная на применении плоской системы расщедоточенных вертикальных скважинных зарядов уменьшенного диаметра [17] и переменной длины (рис. 3). Таким образом, создается экранирующий слой породы, защищающий кварцевую жилу от воздействия основных зарядов рыхления увеличенного диаметра ($d_c = 120$ мм). Отбойка кварцевого сырья вскрытой жилы осуществляется безвзрывным способом, с помощью гидромолота, навешиваемого на экскаватор ЭО-5225 (рис. 4).

Рис. 4. Технологическая схема безвзрывной отбойки кварцевой жилы

Fig. 4. Flow sheet of quartz vein blastless breaking

Согласно требованиям к эксплуатации гидромолотов на базе гусеничных экскаваторов, допустимая масса навешиваемого оборудования не должна превышать 10 % массы экскаватора, что для ЭО-5225 составляет не более 3810 кг. В соответствии с этим требованием по ограничению эксплуатационной массы и необходимым параметрам работы гидросистемы экскаватора для разрушения скального материала большой твердости (кварца) принят гидромолот типа Delta F-45S с массой полного комплекта 3284 кг и энергией удара 9,97 кДж.

Технология ведения взрывных работ по вскрышным породам в приконтактной зоне с жилой кварца следующая:

- бурение скважин производится долотом $D = 90$ мм (типа CIR90);
- в зависимости от падения жилы $20^\circ\text{--}70^\circ$ в 1–3-м крайних рядах скважин бурятся укороченные скважины с недобуром до тела жилы в 20–40 см (рис. 3);
- в качестве ВВ используется граммонит 79/21, инициирование – прямое с помощью ЭД и детонирующего шнура ДШН-10 (АО «НМЗ Искра») с порядным замедлением с использованием пиротехнических реле РП-Д-80 с замедлением 80 мс.

Расстояние между скважинами, м, при взрывании пород в приконтактной зоне с кварцем является одним из определяющих сейсмическое воздействие на массив параметром, который можно вычислить с учетом физико-механических свойств пород (табл. 1) по следующим зависимостям [18–22]:

$$a = k_{от} d_c \left[1 + 2^{1/n} \right] \left[\frac{2\nu P_{дл} \left(\frac{Q_{ВВ}}{Q_c} \right)^\chi}{\{\sigma_p(1-\nu)(1-c)\}} \right]^{1/z};$$

$$z = \frac{2+\nu}{1-\nu}, \quad n = \frac{2-\nu}{1-\nu};$$

$$P_{дл} = \frac{10\bar{\Delta}\vartheta_d}{4g};$$

$$c = \frac{\bar{\Delta}\vartheta_d}{\rho C_p},$$

где $k_{от}$ – коэффициент, учитывающий ориентацию естественной трещиноватости в массиве относительно плоскости оконтуривания (0,95–1,2); d_c – диаметр скважины, мм; ν – коэффициент Пуассона; $P_{дл}$ – детонационное давление в заряде ВВ, Па; $Q_{ВВ}$ – объем заряда ВВ в скважине, м³; Q_c – объем скважины, м³; $P_{дл}$ – детонационное давление в заряде ВВ, Па; χ – показатель адиабаты (1,17–1,25); σ_p – предел прочности на растяжение, Па; c – безразмерный коэффициент; z – степень затухания ударной волны в зоне разрушения; n – степень затухания в зоне образования трещины; $\bar{\Delta}$ – средняя плотность заряда ВВ в скважине, кг/м³; ϑ_d – скорость детонации, м/с; ρ – плотность горной породы, кг/м³; C_p – скорость продольной волны в породе.

Длина взрывных скважин в приконтактной зоне, где величина перебура $l_n = 0$, при известной величине преодолеваемого сопротивления W_n может быть установлена из следующего выражения, м:

$$l_{ск} = l_{з.п} + l_{заб} = \left[\frac{W_n}{\sqrt{(W_p/W_n)^4}} - 1 \right] + l_{заб},$$

где $l_{з.п}$ – длина заряда над подошвой уступа, м; $l_{заб}$ – длина забойки скважины, м; W_p – расчетная величина сопротивления по подошве уступа, преодолеваемая вертикально одиночным скважинным зарядом, м.

Расчетная величина сопротивления по подошве уступа может быть установлена следующей зависимостью, м:

$$W_{\pi} = 53k_{\pi}d_c \sqrt{\frac{\Delta}{\rho k_{\text{BB}}}}(1,6 - 0,5m),$$

где k_{π} – коэффициент, учитывающий трещиноватость массива (1,0–1,3); k_{BB} – коэффициент, учитывающий относительную работоспособность ВВ (для граммонита 79/21 $k_{\text{BB}} = 1$); m – коэффициент сближения зарядов скважин.

С учетом того, что подготавливаемый участок в приконтактной зоне сложен однородными по трещиноватости и физико-механическим свойствам породами, а разрушение их происходит в результате воздействия волны напряжений, для отдельных, пронизанных зарядом ВВ, на которые оказывает воздействие квазистатическое давление взрывных газов и соударение кусков, для основной части массива, расчет параметров взрывания на заданную степень дробления можно определить следующими зависимостями [18–22]:

– необходимое количество ВВ на единицу объема взорванной горной массы в пределах зоны регулируемого дробления, в которой размер крупных кусков после взрыва не превысит кондиционного размера, кг/м³:

$$q = 0,9 \frac{\sigma_p \delta}{E Q_{\text{вф}} d_d} \left(\frac{1 - \nu}{\nu} \right)^2 + 0,2 \cdot 10^{-7} \frac{E l_{\text{ср.о}}}{\delta Q_{\text{вф}}} \left(\frac{d_c}{a} \right)^2,$$

где σ_p – предел прочности образца горной породы на растяжение, Па; δ – величина раскрытия трещин в массиве (определяется средним размером отдельности и категорией пород по трещиноватости), м; E – модуль Юнга, Па; $Q_{\text{вф}}$ – теплота взрыва применяемого ВВ, кДж/кг; d_d – размер допустимого (кондиционного) куска, м; $l_{\text{ср.о}}$ – средний размер естественной отдельности в массиве, м; d_c – диаметр скважины, м;

– интервал замедления, обеспечивающий более полное использование энергии волн напряжения в результате уменьшения ширины трещин вблизи последующей группы зарядов, мс:

$$\tau = 57,5 \frac{k_{\text{гр}} r^2}{d_c \vartheta_{\text{пв}}} \left(\frac{\delta}{l_{\text{ср.о}}} \right)^{3/2},$$

где $k_{\text{гр}}$ – коэффициент, учитывающий геометрическое расхождение энергии взрыва; для плоских зарядов $k_{\text{гр}} = 1$, для цилиндрических зарядов $k_{\text{гр}} = 2$; $\vartheta_{\text{пв}}$ – скорость продольной волны в образце горной породы, м/с; r – расстояние от первой группы зарядов до максимально удаленной границы зоны разрушения от взрыва последующей группы зарядов ($r = 1,5a_1$; a_1 – расстояние между двумя группами последовательно взрывааемых зарядов, м), м.

Качество подготовки взорванной горной массы определяется величиной гранулометрического состава, которая в общем случае может быть представлена функцией распределения размеров кусков x :

$$P(X < x) = p_1(1 - \exp(x/\sigma_1)) + p_2(1 - \exp(x^2/2\sigma_2^2)),$$

где $\sigma_{1,2}$ – параметры распределения, величина которых зависит от удельного расхода ВВ; $p_{1,2}$ – доля в смеси мелких и крупных кусков, дол. ед.

После уборки вскрышной породы экскаватором ЭО-5225 и обнажения кварцевой жилы на рабочем горизонте производится его переоборудование с ковша на гидромолот типа Delta F-45S. Отбойка вскрытой («обнаженной») кварцевой жильной массы производится с помощью гидромолота, навешиваемого на экскаватор ЭО-5225 в комплектации гидрооборудования и переходных устройств (квик-каплер, переходная плита) с возможностью быстрого подключения гидромолота. Масса гидромолота составляет 0,1 массы экскаватора.

Горно-геометрическим анализом кварцевых жил установлено, что при реализации предлагаемых технических решений в пределах одного рабочего горизонта отрабатываемых карьеров может располагаться до 200 т кварцевого сырья (80 м³). Из опыта разрушения крепких пород гидромолотом с энергией удара свыше 5 кДж известно, что производительность гидромолота с установкой его на экскаваторе может превышать 20 м³/ч, с учетом ослабления кварцевого массива от сейсмического воздействия взрыва производительность отбойки может возрасти до 30 м³/ч. Время переоборудования экскаватора и подключения гидромолота (и обратно) составляет в среднем 20 мин (в зависимости от квалификации машиниста). Таким образом, при производительности гидромолота 15–30 м³/ч и времени, затрачиваемого на переоборудование экскаватора *ковш–гидромолот–ковш* 30–40 мин/см, он сможет за одну 8-часовую смену обеспечить отбойку вскрытого кварца на рабочем горизонте (уступе) карьера.

Погрузка отбитой кварцевой руды в автосамосвалы производится фронтальным колесным погрузчиком ПК-46 с ковшом вместимостью 2,4 м³ (рис. 3). При необходимости, для соответствия внутреннему стандарту предприятия СТП КИ-01-08-09, можно предусмотреть внутрикарьерную предварительную сортировку кварца по крупности куска с выделением товарной фракции –400...+20 мм с помощью неподвижного колосникового грохота или полумобильной (с дизельным приводом) установки первичной сортировки типа КМ УЗС-41Т (ООО «КАН-МАШ ДСО», г. Канаш Чувашской Республики).

Выводы. Востребованное на рынке высококачественное кварцевое сырье с минимальным содержанием вредных примесей достаточно редко встречается в природе. Значительный объем кварцевого сырья сосредоточен в небольших кварцевых жилах с запасами от 100 до 2 тыс. т и глубиной заложения 0–50 м от поверхности. Совершенствование технологий разработки небольших кварцевых жил с минимальными потерями сырья является актуальной научно-технической задачей.

Разработка кварцевых жил осложнена тем, что жилы располагаются в достаточно прочных вмещающих породах, которые необходимо убирать с помощью БВР. В то же время сейсмическое воздействие взрывных работ приводит к «лавинообразному» разрушению кварца на некондиционные фракции, непригодные для дальнейшей переработки и обогащения.

Для сокращения потерь сырья при добыче на примере разработки Кыштымского месторождения гранулированного кварца предлагаются следующие технические решения:

- разработку вести небольшими карьерами (траншеями) глубиной до 30 м с уступами высотой до 4 м, расположенными по направлению простирания жилы;
- взрывные работы по кварцу не производить, а ограничить их использование приконтактной зоной вскрышных пород;
- скважины в приконтактной зоне вскрышных пород (1–3 ряда) бурятся минимальным диаметром (до 90 мм), укороченными с учетом угла падения кварцевой жилы (20°–70°), не доходят до кварца на 20–40 см, что позволяет создать предохранительную прослойку породы, которая частично гасит сейсмическую энергию взрыва, при этом используется порядное замедление;

– отбойку обнаженного кварца производить с помощью гидромолота, навешиваемого на гидравлический экскаватор, при производительности стандартного гидромолота 15–30 м³/ч он может за 8-часовую смену обеспечить к отгрузке до 200 т (80 м³) кварцевого сырья, что соответствует объему кварца, залегающего в пределах 4-метрового рабочего горизонта при разработке типичной жилы.

Предлагаемые технические решения позволяют вовлечь в разработку небольшие кварцевые жилы гранулированного кварца высокой чистоты, обеспечат высокую производительность и эффективность горных работ без значительных потерь дефицитного сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Ю. М., Мельников Е. П., Маханек Е. К., Мельников Н. И. Минерогенез метаморфогенных месторождений горного хрусталя и гранулированного кварца. Л.: Наука, 1977. 113 с.
2. Кузьмин В. Г., Кравец Б. Н. Минералургия жильного кварца. М.: Недра, 1990. 294 с.
3. Becker A. Quartz pressure solution: influence of crystallographic orientation // *Journal of Structural Geology*. 1995. Vol. 17. No. 10. P. 1395–1405.
4. Петруха Л. М. Строение геологических полей месторождений гранулированного кварца // *Известия УГТУ*. 1998. № 8. С. 108–112.
5. Исаев В. А. Структурные примеси в кварце. Часть I. Обзор и анализ традиционных способов очистки кварца от структурных примесей // *ГИАБ*. 2006. № 9. С. 11–23.
6. Исаев В. А. Структурные примеси в кварце. Часть II. Обоснование способа глубокой очистки кварца с использованием процессов его термомодификационной обработки // *ГИАБ*. 2007. № 9. С. 29–37.
7. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Сазонов В. Н. Онтогенетические типы гранулированного кварца // *Известия УГТУ*. 2010. № 24. С. 21–28.
8. Современные проблемы изучения и использования минерально-сырьевой базы кварцевого сырья – 2011 // *Материалы Всероссийского совещания (24–27 мая 2011): сб. науч. ст.* Миасс–Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 168 с.
9. Кузнецов С. К., Лютоев В. П., Шанина С. Н., Светова Е. Н., Сокерина Н. В. Особенности качества жильного кварца уральских месторождений // *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2011. № 4(8). С. 65–72.
10. Gotze J., Mockel R. Quartz: deposits mineralogy and analytics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 360 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22161-3
11. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Савичев А. Н. Кварц жил выполнения Урала // *Известия УГТУ*. 2014. № 3(35). С. 5–11.
12. Ганопольский М. И., Барон В. Л., Белин В. А., Пупков В. В., Сивенков В. И. Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы. М.: МГТУ, 2007. 563 с.
13. Соколов И. В., Смирнов А. А., Рожков А. А. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца // *ГИАБ*. 2016. № 7. С. 337–350.
14. Sokolov I. V., Rozhkov A. A. Investigating the parameters of dispersion in the plane system of charges at granular quartz deep mining // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2019; 6: 5–13.
15. Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М., Козлова М. В. Исследование горных пород карьера ОАО «Ураласбест» на соответствие требованиям для производства из них строительных материалов // *Маркшейдерия и недропользование*. 2019. № 3(101). С. 42–47.
16. Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. Анализ эксплуатационных показателей горнодобывающего оборудования ведущих железорудных карьеров России // *Известия вузов. Горный журнал*. 2019. № 2. С. 40–50.
17. Соколов И. В., Смирнов А. А., Рожков А. А. Повышение эффективности добычи кварца применением плоской системы рассредоточенных зарядов // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 1. С. 56–65.
18. Матвейчук В. В., Чурсалов В. П. Взрывные работы. М.: Академический проект, 2002. 384 с.
19. Кузцов Б. Н., Белин В. А. Проектирование и организация взрывных работ. М.: Горная книга, 2012. 416 с.
20. Ефремов Э. И., Петренко В. Д., Рева Н. П., Кратковский И. Л. Механика взрывного разрушения пород различной структуры. Киев: Наукова думка, 1984. 192 с.
21. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. М.: Госгортехиздат, 1962. 200 с.
22. Кузцов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. М.: МГТУ, 2009. 471 с.

Сведения об авторах:

Кантемиров Валерий Данилович – кандидат технических наук, заведующий сектором управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukrkant@mail.ru

Титов Роман Сергеевич – старший научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Яковлев Андрей Михайлович – старший научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: krissy-puh@yandex.ru

Козлова Мария Владимировна – техник сектора управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: mkoz94@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-14-25

Production cycle characteristics of high-purity quartz opencasting**Valerii D. Kantemirov¹, Roman S. Titov¹, Andrei M. Iakovlev¹, Maria V. Kozlova¹**¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.**Abstract**

Introduction. Currently, the main raw material for obtaining transparent quartz glass, an indispensable component in the production of single-crystal silicon, is high-purity quartz concentrate. The concentrate is a product of grinding natural "pure" quartz, which has undergone a cycle of mechanical and deep chemical refining, with a particle size of 0.1–0.3 mm and a total impurity content of no more than 20–30 ppm. However, in nature, deposits of pure quartz are quite rare, and it means that each explored site is of particular importance and is to be developed with minimal losses of quartz raw materials.

Research aim is to develop technical solutions for processing small veins of high-purity granulated quartz.

Methodology. Physical and mechanical properties and mining conditions for the individual quartz veins of the Kyshtym deposit are analyzed. Production cycle solutions for opencasting quartz veins have been developed allowing to reduce the degree of quartz over-grinding.

Results. Granulated quartz, due to its structure, has the property of "avalanche" destruction into small grains. This significantly reduces the yield of the conditioned fraction –400 +20 mm, and regarding small reserves of quartz in veins, on average 0.1–2 thousand tons, it raises the question as to whether the development is feasible and effective. To increase the yield of conditioned fractions of quartz raw materials, a non-explosive technology of quartz breaking is proposed with a hydraulic hammer on a hydraulic excavator in combination with quartz vein preliminary exposure from the host rocks using a special technology for blasting rocks in the contact zone of "quartz-rock".

Conclusions. The proposed technical solutions will allow to involve small quartz veins of high purity granulated quartz into the development and provide high productivity and efficiency of mining operations without significant losses of scarce raw materials.

Key words: granulated quartz; quartz raw material; quartz veins; blasting technologies; quartz breaking with a hydraulic hammer.

Acknowledgements. The article has been prepared based on the materials from the academic research fulfilled under the program of the Fundamental Scientific Research of RAS. Theme no. 1. The methods of recording transitional processes of technological development when developing deep complex mineral deposits (no. 0405-2019-0005).

REFERENCES

1. Sokolov Iu. M., Melnikov E. P., Makhanek E. K., Melnikov N. I. *Mineralogeny of metamorphogene deposits of rock crystal and granular quartz*. Leningrad: Nauka Publishing; 1977. (In Russ.)
2. Kuzmin V. G., Kravets B. N. *Minerallurgy of gangue quartz*. Moscow: Nedra Publishing; 1990. (In Russ.)
3. Becker A. Quartz pressure solution: influence of crystallographic orientation. *Journal of Structural Geology*. 1995; 17(10): 1395–1405.
4. Petrukha L. M. Subsurface geometry of the granular quartz deposit. *Izvestiia UGGU = News of the Ural State Mining University*. 1998; 8: 108–112. (In Russ.)
5. Isaev V. A. Structural impurities in quartz. Part 1. Review and analysis of traditional ways of quartz refinement from structural impurities. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 9: 11–23. (In Russ.)
6. Isaev V. A. Structural impurities in quartz. Part 2. Rationale for the technique of quartz deep refinement using thermal modification processing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2007; 9: 29–37. (In Russ.)
7. Polenov Iu. A., Ogorodnikov V. N., Sazonov V. N. Onthogenic types of granulated quartz. *Izvestiia UGGU = News of the Ural State Mining University*. 2010; 24: 21–28.

8. Modern problems of studying and using mineral raw quartz stock–2011. In: *Collection of scientific articles. All-Russia Conference Proceedings (24–27 May 2011)*. Miass–Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2011. (In Russ.)
9. Kuznetsov S. K., Liutov V. P., Shanina S. N., Svetova E. N., Sokerina N. V. Peculiarities of vein quartz quality, the Urals deposits. *Izvestiia Komi NTs UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2011; 4(8): 65–72. (In Russ.)
10. Gotze J., Mockel R. *Quartz: deposits mineralogy and analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 360 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22161-3
11. Polenov Iu. A., Ogorodnikov V. N., Savichev A. N. Urals veins quartz. *Izvestiia UGGU = News of the Ural State Mining University*. 2014; 3(35): 5–11. (In Russ.)
12. Ganopolskii M. I., Baron V. L., Belin V. A., Pupkov V. V., Sivenkov V. I. *Methods of blasting. Special blasting operations*. Moscow: MSMU Publishing; 2007. (In Russ.)
13. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Rationale for optimum parameters of blasting at quartz breaking. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 7: 337–350. (In Russ.)
14. Sokolov I. V., Rozhkov A. A. Investigating the parameters of dispersion in the plane system of charges at granular quartz deep mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 5–13. (In Russ.)
15. Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M., Kozlova M. V. OAO Uralasbest rock test on compliance with the requirements for construction materials manufacture. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2019; 3(101): 42–47. (In Russ.)
16. Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M. The analysis of mining equipment performances in the leading iron-ore open pits of Russia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 2: 40–50. (In Russ.)
17. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Efficiency improvement of quartz production by mean of using two-dimensional system of distributed charges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 1: 56–65. (In Russ.)
18. Matveichuk V. V., Chursalov V. P. *Blasting*. Moscow: Akademicheskii proekt Publishing; 2002. (In Russ.)
19. Kutuzov B. N., Belin V. A. *Blasting design and organization*. Moscow: Gorniaia kniga Publishing; 2012. (In Russ.)
20. Efremov E. I., Petrenko V. D., Reva N. P., Kratkovskii I. L. *Mechanics of breaking rock of various structure by blast*. Kiev: Naukova dumka Publishing; 1984. (In Russ.)
21. Khanukaev A. N. *Power of stress waves when breaking up rock by blast*. Moscow: Gosgortekhnizdat Publishing; 1962. (In Russ.)
22. Kutuzov B. N. *Methods of blasting. Part 1. Breaking rock by a blast*. Moscow: MSMU Publishing; 2009. (In Russ.)

Received 15 April 2020

Information about authors:

Valerii D. Kantemirov – PhD (Engineering), quality management sector Chief, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukrkant@mail.ru

Roman S. Titov – senior researcher, quality management sector, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Andrei M. Iakovlev – senior researcher, quality management sector, Institute of Mining UB RAS. E-mail: krissy-puh@yandex.ru

Maria V. Kozlova – technician, sector of quality management of mineral raw materials, Institute of Mining UB RAS. E-mail: mkoz94@mail.ru

Для цитирования: Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М., Козлова М. В. Технологические особенности открытой разработки высокочистого кварца // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 14–25. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-14-25

For citation: Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M., Kozlova M. V. Production cycle characteristics of high-purity quartz opencasting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 14–25 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-14-25