

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.272

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13>

## ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ МАЛЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А.

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

### Аннотация

**Постановка задачи (актуальность работы):** расширение сырьевой базы кварцевой отрасли возможно за счет вовлечения в отработку малых кварцевых жил с незначительными запасами. Одной из основных проблем при этом является обоснование экономической и экологической целесообразности освоения таких маломасштабных объектов. Решением может служить использование мощностей и инфраструктуры существующих горно-обогатительных производств при наличии транспортной доступности обогатительной фабрики для данного типа руд. При этом первостепенной задачей является обоснование способа отработки жил. При кажущейся очевидности применения открытого способа – небольшие глубина залегания (до 100 м) и запасы (до 35 тыс. т) – его преимущества могут быть нивелированы относительно большим объемом вскрыши, необходимостью изъятия из лесного оборота соответствующих площадей под размещение отвалов вскрышных пород, следовательно, значительным снижением экономической и экологической эффективности. В данной работе на примере жилы №193 Кузнецехинского месторождения гранулированного кварца комплексно рассматривается вопрос об эффективности и целесообразности отработки запасов малого месторождения ценного сырья подземным способом. **Цель работы** – разработка технических решений и установление экономической целесообразности освоения малых кварцевых жил. **Используемые методы:** проведение аналитических и экспериментальных исследований, технико-экономическая оценка технических решений. **Результат:** сравнение с открытым способом разработки показывает экономическое и экологическое преимущество подземного способа. Разработанная подземная геотехнология обеспечивает экономическую целесообразность освоения жилы №193 Кузнецехинского месторождения при организации обособленного участка в составе действующего Кыштымского ГОКа. Эффективность отработки запасов достигается за счет рационального способа и схемы вскрытия, применения комплекса самоходного оборудования на подготовительных и очистных работах, системы разработки с открытым очистным пространством и площадным выпуском руды, способа массовой отбойки рассредоточенными скважинными зарядами и транспортирования жильной массы на поверхность погрузо-доставочными машинами (ПДМ). Обеспечивается минимизация вредных экологических последствий путем отказа от открытого способа разработки за счет резкого сокращения земельного отвода, сохранения лесного покрова территории, утилизации пустых пород от проходки в выработанном пространстве камер, использования хвостохранилища действующей обогатительной фабрики. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при обосновании стратегии развития сырьевой базы высокого кварца, изыскании и проектировании подземных рудников, осваивающих маломасштабные месторождения.

**Ключевые слова:** малое месторождение, гранулированный кварц, способ и схема вскрытия, система разработки, рассредоточенный заряд.

### Введение

Кузнецехинское месторождение гранулированного кварца располагается в Челябинской области в 18 км от г. Кыштым. В пределах разведенной части Кузнецехинского месторождения детально изучено 16 жил гранулированного кварца, приуроченных к толще метаморфических пород верхнего протерозоя [14, 15]. Жилы

сложены в основном тонко-мелкозернистым гранулированным кварцем. Основные запасы месторождения сосредоточены в самой крупной жиле №193. По данным детальной разведки, они составляли 46 тыс. т при содержании гранулированного кварца 98,7%, т.е. балансовые запасы гранулированного кварца – 45,5 тыс. т. В конце 1980-х гг. верхняя часть жилы была частично отработана открытым способом на глубину до 5 м. В результате было вынуто около 11 тыс. т жильной массы. На настоящий момент расчет-

© Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г.,  
Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А., 2018

ные балансовые запасы приняты равными 35 тыс. т. Длина жилы по простирианию 220 м, по падению 65 м. Угол падения 75-83°, на некоторых участках – 60-70°. Мощность жилы 2-5 м. На контакте жила обладает четкими геологическими границами. Вмещающие породы относятся к устойчивым и среднеустойчивым. Основными источниками воды при отработке жилы №193 являются подземные воды водоносного комплекса и атмосферные осадки. В целом инженерно-геологические условия отработки жилы №193 Кузнецкого месторождения достаточно благоприятны. Район месторождения обладает развитой горнодобывающей промышленностью, в частности функционирует Кыштымский горно-обогатительный комбинат (КГОК) – промышленное предприятие по добыче и обогащению жильного гранулированного кварца, осваивающее подземным способом жилу №175 Кыштымского месторождения [16]. Обогащение добытой руды принято на обогатительных мощностях КГОК.

### **Организационные, технические и технологические решения**

При подземном способе отработки целесообразно организовать на жиле №193 обособленный участок – шахту, входящую в состав Кыштымского подземного рудника. При этом рабочий персонал участка обслуживается в административно-бытовом комбинате рудника и доставляется автобусом.

Годовая производственная мощность участка принята исходя из потребностей КГОКа, равной 5 тыс. т жильной массы, режим работы – односменный. Небольшая производственная мощность участка позволяет рекомендовать сезонную отработку только в летний период (май-сентябрь). Это дает возможность строительства производственных помещений из временных разборных конструкций, а также отказаться от затрат на их отопление в зимнее время. Также не потребуется подогрев воздуха, подаваемого в шахту, в период отрицательных температур.

На промплощадке шахты необходимо строительство следующих объектов:

- вентиляторная главного проветривания;
- компрессорная станция;
- ЛЭП и электроподстанция;
- хозяйствственно-бытовое здание;
- инженерные сети и коммуникации.

Капитальные затраты на строительство объектов поверхности шахты составят 32000 тыс. руб.

Добытая жильная масса размещается на рудном складе, где производится первичная рудосортировка с отделением пустой породы и некондиционной мелкой фракции. По опыту Кыштымского подземного рудника, выход годного для обогащения кварцевого сырья составляет около 70%, т.е. годовой объем транспортировки кварца ориентировочно равен 3,5 тыс. т. При принятом количестве рабочих дней (125) суточная производительность составляет 28 т. При транспортировании автосамосвалом КАМАЗ-45141 грузоподъемностью 10 т на промплощадку подземного рудника на расстояние 23 км время одного рейса составит около 2 ч. Перевозка суточного объема добытого кварца обеспечивается работой одного автосамосвала. Этой же машиной обеспечивается и доставка на участок необходимых материалов и оборудования.

Верхняя часть жилы №193 частично отработана открытым способом на глубину до 5 м. Ее доработка подземным способом оценена при использовании самоходной техники на проходческих, очистных работах и транспортировании горной массы.

Освоение подкарьерных запасов целесообразно производить в два этапа: 1-й этап – вскрытие и отработка основных запасов в этаже 385/355 м (90%), 2-й этап – вскрытие и очистная выемка запасов в этаже 355/320 м (10%).

Запасы жилы вскрываются следующими выработками:

- траншея 390/379 м;
- транспортный уклон 379/320 м;
- заезды на гор. 379 м, 355 м, 345 м и 320 м;
- вентиляционно-закладочный штрек гор. 379 м;
- доставочные штреки гор. 355 м, 345 м, 320 м и камерными выработками;
- фланговые вентиляционно-ходовые восстающие (ВХВ) №1 и 2.

Разрезная траншея проходится открытым способом с поверхности (отм. 390 м) до гор. 379 м под углом 10° при помощи экскаватора. Транспортный уклон проходится в лежачем боку месторождения с гор. 379 м до гор. 320 м под углом 10° и служит для транспортирования руды и породы на поверхность, подачи в шахту свежего воздуха, прокладки коммуникаций, водоотлива, доставки к местам работы людей, материалов и оборудования. Транспортирование горной массы из забоя непосредственно на поверхность осуществляется ПДМ типа *Atlas Copco ST 3.5*.

Принципиальная схема вскрытия приведена на **рис. 1**.

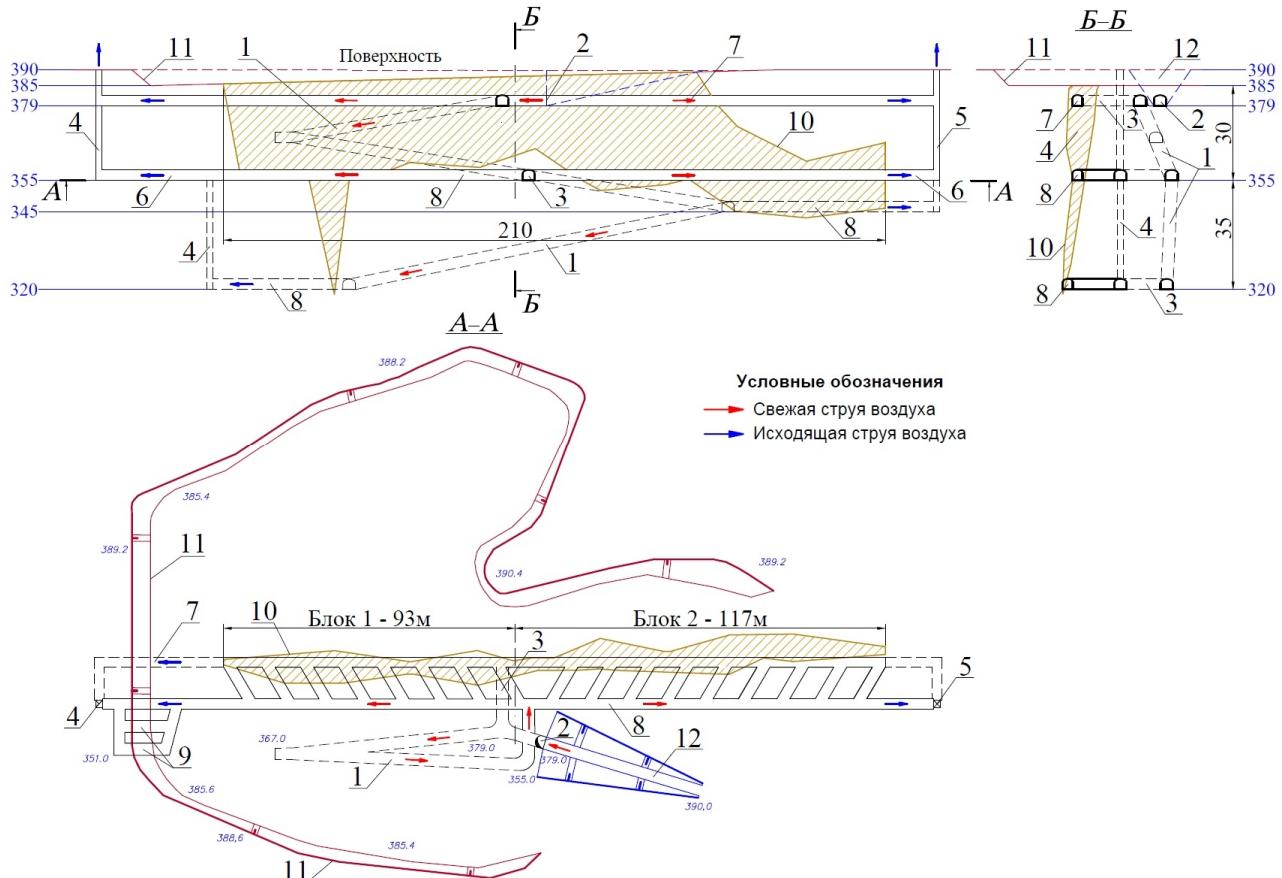


Рис. 1. Схема вскрытия жилы №193:

1 – транспортный уклон; 2 – портал транспортного уклона; 3 – заезд на горизонт; 4, 5 – фланговые BXB №1 и 2; 6 – вентиляционная сбойка; 7 – вентиляционно-закладочный штреек; 8 – доставочный штреек; 9 – камерные выработки; 10 – контур рудного тела; 11 – граница карьера; 12 – траншея

Горизонтальные и наклонные выработки проходятся буровзрывным способом. Сечения выработок приняты в соответствии с габаритами размещаемого в них транспортных средств и оборудования. Форма сечения принята с вертикальными стенками и трехцентровым сводом. Крепление вскрывающих выработок производится штангами в сочетании с металлической сеткой и набрызгбетоном толщиной 5 см.

Бурение шпуров проходческого забоя и под анкерное крепление осуществляется буровой установкой типа *Atlas Copco Boomer T1D* коронками диаметром 42 мм. Зарядка шпуров производится гранулированным ВВ типа граммонит 21 ТМЗ зарядчиком ЗМК-1А. Уборку породы из забоя на поверхность, а также доставку материалов и оборудования к местам работы производят ПДМ типа *Atlas Copco ST 3.5*. Проветривание проходческих забоев предусматривается двумя вентиляторами местного проветривания ВМ-6М с гибкими трубопроводами. Фланговые BXB

проходят с помощью проходческого комплекса типа КПВ-4, оборудованного навесными телескопными перфораторами ПТ-48. Форма сечения – прямоугольная. Восстающие оборудуют лестничными отделениями.

Объем ГКР для проходки вскрывающих выработок составит 6875 м<sup>3</sup>. Капитальные затраты на проходку вскрывающих выработок, при средней взвешенной себестоимости проходки выработок 3248 руб./м<sup>3</sup> (горизонтальных и наклонных выработок – 3100 руб./м<sup>3</sup>, вертикальных – 4700 руб./м<sup>3</sup>, камерных – 3800 руб./м<sup>3</sup>), составят 22330 тыс. руб.

Капитальные затраты на технологическое и стационарное оборудование с учетом использования имеющегося оборудования Кыштымского подземного рудника составят 18200 тыс. руб.

Суммарные капитальные затраты строительство шахты – 72530 тыс. руб.

В рассмотренных условиях наиболее рациональным является применение варианта камерной системы разработки с закладкой выработан-

ногого пространства пустой породой от проходки и отходами первичной рудосортировки жильной массы с формированием изолирующего подкарьерного целика-потолочины [17] и применением самоходного оборудования.

На 1-м этапе порядок подготовки к выемке запасов в этаже 385/355 м состоит в следующем (рис. 2). В пределах рудного тела в отм. 385 и 355 м выделяют добывчной участок длиной, равной длине рудного тела, – 210 м и высотой, равной высоте этажа, – 30 м. Запасы добывчного участка в этаже 385/355 м по простирианию рудного тела разбивают на две выемочные единицы – два очистных блока, состоящих из камеры и потолочины. Длина блоков составляет 93 и 117 м, ширина равна мощности рудного тела. Первоначально осуществляют подготовку к выемке запасов блока 1 на северо-востоке, затем блока 2 на юго-западе. Для изоляции подземных выработок от карьерного пространства в кровле камер под дном карьера предусматривается формирование временного целика-потолочины толщиной 3 м, длиной, равной длине камеры, и шириной, равной мощности рудного тела. Из транспортного уклона, пройденного до отм. 355 м и расположенного по центру рудного тела, проходят нижний заезд на гор. 355 м (выпуска и доставки) и верхний заезд на гор. 379 м (вентиляционно-закладочный). Из верхнего заезда к флангам рудного тела проходят вентиляционно-закладочный штрек гор. 379 м, располагаемый ниже дна карьера (отм. 385 м) на 6 м, что позволяет сформировать потолочину толщиной 3 м

над камерами. На флангах вентиляционно-закладочный штрек соединяется с ВХВ вентиляционными сбойками. Из нижнего заезда гор. 355 м к флангам рудного тела проходят доставочный штрек, вентиляционные сбоики доставочного штреека с фланговыми ВХВ, траншнейный штрек и погрузочные заезды. На флангах рудного тела из вентиляционных сбоек проходят (по породе) ВХВ с выходом на поверхность. В камере блока 1 проходит отрезной восстающий 379/355 м.

Объем ПНР по 1-му этапу составляет 4810 м<sup>3</sup>.

Очистная выемка запасов блока, включающего запасы камеры и изолирующей потолочины, осуществляют в две стадии: на 1 стадии вынимают камерные запасы, на второй – запасы изолирующей целика. Отбойка камерных запасов ведется вертикальными слоями (высотой 21 м) восходящих и нисходящих вееров скважин, пробуренных из вентиляционно-закладочного и траншнейного штрееков соответственно. Выпуск отбитой руды – площадной из погрузочных заездов с помощью ПДМ, транспортирование ее на поверхность до рудного склада также ПДМ (см. рис. 2).

Погашение отработанной камеры осуществляют путем закладки выработанного пространства пустой породой и отходами рудосортировки [18]. Закладочный массив формируют из вентиляционно-закладочного штреека с помощью ПДМ. Закладочные работы можно производить в период выемки запасов камеры, но с отставанием на 50 м от очистного забоя для предотвращения разубоживания руды.

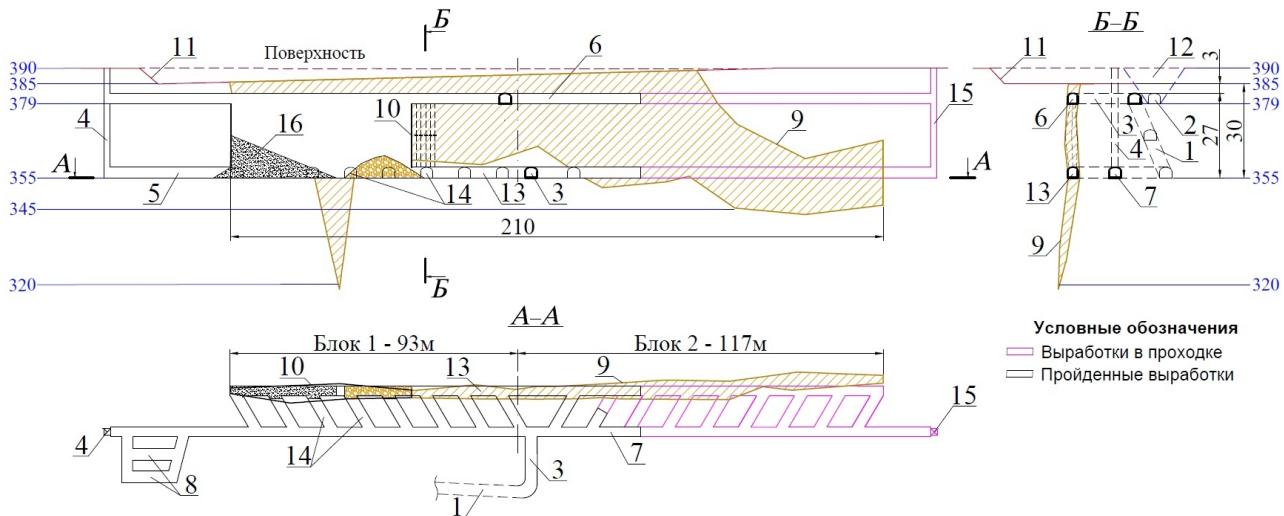


Рис. 2. Система разработки жилы №193:

1 – транспортный уклон; 2 – портал транспортного уклона; 3 – заезд на горизонт; 4, 15 – фланговые ВХВ №1 и 2; 5 – вентиляционная сбойка; 6 – вентиляционно-закладочный штрек; 7 – доставочный штрек; 8 – камерные выработки; 9 – контур рудного тела; 10 – контур выработанного пространства; 11 – граница карьера; 12 – траншея; 13 – буровой штрек; 14 – погрузочные заезды; 16 – закладка

Погашение отработанной камеры осуществляют путем закладки выработанного пространства пустой породой и отходами рудосортировки [18]. Закладочный массив формируют из вентиляционно-закладочного штрека с помощью ПДМ. Закладочные работы можно производить в период выемки запасов камеры, но с отставанием на 50 м от очистного забоя для предотвращения разубоживания руды.

Выемку изолирующего временного целика производят после полной закладки отработанной камеры. Его обуриивание производят скважинами из вентиляционно-закладочного штрека в период бурения скважин для отбойки камерных запасов. Заряжение и массовое взрывание целика зарядами гранулированного ВВ осуществляют из вентиляционно-закладочного штрека, погрузку обрушенной на почву закладочного массива руды производят ПДМ открытым способом, транспортировку ее на поверхность – по существующим подземным выработкам [19].

На 2-м этапе порядок подготовки к выемке запасов ниже гор. 355 м состоит в следующем. Выделяют два блока, состоящих из камеры и потолочины. Блок 3 на юго-западе в этаже 355/345 м длиной 50 м и высотой 10 м и блок 4 на северо-востоке в этаже 355/320 м длиной 7 м и высотой 35 м. Из транспортного уклона, пройденного до отм. 320 м, проходят заезд на горизонты 345 и 320 м. На гор. 345 м проходят доставочный штрек, вентиляционную сбойку, фланговый ВХВ 355/345 м, траншейный штрек, погрузочные заезды и отрезной восстающий 355/345 м. На гор. 320 м проходят доставочный штрек, вентиляционную сбойку, фланговый ВХВ 355/320 м, траншейный штрек, погрузочный заезд и отрезной восстающий 355/320 м.

Объем ПНР по 2-му этапу составляет 1707 м<sup>3</sup>.

Очистная выемка камер осуществляется аналогично 1-му этапу, запасы потолочины после массового взрывания выпускаются под обрушенными породами на гор. 320 и 345 м.

По данной технологии можно прогнозировать величину потерь 12,5% и разубоживания 12,5%, а количество добьтой жильной массы при отработке всех запасов равно 35 тыс. т.

Буровзрывные работы (БВР), по опыту Кыштымского месторождения, следует вести с учетом физико-механических свойств гранулированного кварца (склонность к переизмельчению, значительный коэффициент крепости) [20] и свойств всего массива жилы в целом (блочность, действующие поля напряжений) [21, 22].

Переизмельченный в результате действия взрыва кварц (фракция -20 мм) не пригоден для

дальнейшей переработки и получения ОЧК [23]. Проведенные исследования БВР показали, что степень переизмельчения гранулированного кварца при взрывной отбойке прямо пропорциональна мощности взрыва, т.е. удельному расходу взрывчатого вещества (ВВ), и может быть аппроксимирована линейной зависимостью с достаточно высоким коэффициентом детерминации (**рис. 3**) [24].

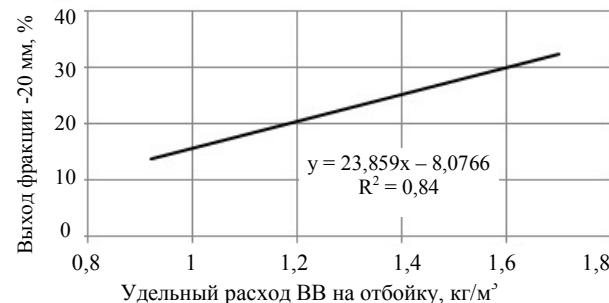


Рис. 3. Зависимость выхода переизмельченной фракции кварца от удельного расхода ВВ

Для повышения качества дробления при отбойке кварца разработан способ массовой отбойки [25], заключающийся в рассредоточении зарядов воздушными промежутками в скважинах уменьшенного диаметра и их мгновенном взрывании. При этом достигается равномерное распределение ВВ по плоскости веера со значительным снижением его удельного расхода на отбойку (порядка 30-40%). Рассредоточение заряда позволяет снизить начальное давление продуктов детонации на единицу поверхности стенок скважины, удлиняя тем самым время воздействия на разрушающую породу, уменьшая близантное действие взрыва, связанное с переизмельчением материала в ближней зоне, и способствует более равномерному дроблению породы [26].

Способ был испытан при массовой отбойке веерами скважин диаметром 65 мм на Кыштымском подземном руднике, при этом удельный расход ВВ был снижен с 1,4 до 0,9 кг/м<sup>3</sup> при улучшенном качестве дробления руды. Эффективность способа оценивалась по критерию максимального выхода кондиционного куска руды. Для гранулированного кварца это кусок +65-700 мм на первой стадии грохочения горной массы и +20-65 мм на второй (**рис. 4**).

Как видно из графика, при сниженном на 35,7% удельном расходе ВВ выход кондиционного куска суммарно повысился на 10,7%, однако уже при первом грохочении повышение составило 33,7% относительно результатов отбойки веером зарядов со сплошной конструкцией.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что предлагаемый способ отбойки отвечает гор-

но-геологическим и горнотехническим условиям отработки жилы, может обеспечить снижение потерь кварца в виде некондиционной фракции и повышение производительности труда на рудосортировке [27].

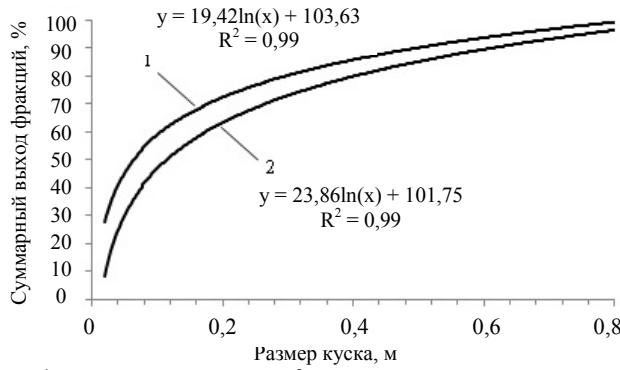


Рис. 4. Сравнение качества дробления гранулированного кварца при разных конструкциях зарядов в веерах скважин с одинаковыми параметрами расположения в массиве

Проветривание горных выработок предусмотрено нагнетательным способом с расположением главной вентиляторной установки у портала транспортного уклона (отм. 379 м). Свежий воздух подается по транспортному уклону на рабочие горизонты и далее – в проходческие забои и добычные блоки (см. рис. 1). Загрязненный воздух из рабочих забоев и служебных камер по фланговым BXB выдается на поверхность.

Для проветривания подземного рудника, ведущего добычу руды с использованием самоходного дизельного оборудования, определяющим фактором потребного количества воздуха является загрязнение воздуха выхлопными газами. Исходя из того, что на проходке выработок и на очистных работах будет задействована одна ПДМ с двигателем мощностью 138 кВт, потребное количество воздуха можно принять равным 35 м<sup>3</sup>/с. Подача необходимого объема воздуха обеспечивается вентилятором *Atlas Copco AVN 140.75.4.8*.

При эксплуатации рудника предусмотрено размещение насосной станции главного водоотлива и водосборников вблизи доставочного штрука гор. 355 м (отм. 351 м). Водо-отливной трубопровод прокладывается по фланговому BXB №2 до поверхности (отм. 390 м), где производится слив шахтной воды в водосборный колодец. Для откачки воды в максимальном объеме 70 м<sup>3</sup>/час приняты три насоса ЦНС.Г-105/98 (один в работе, один резервный, один в ремонте).

### Сравнение с открытым способом разработки

Экономические расчеты базируются на следующих исходных данных. По аналогии с Кыштым-

ским подземным рудником себестоимость добычи подземным способом 1 т жильного кварца принята 2050 руб. [28]. Условная цена реализации жильного кварца равна 7000 руб. за 1 т. Общий доход при отработке жилы №193 составит 171500 тыс. руб., условная прибыль до уплаты налогов – 27220 тыс. руб. Продолжительность строительства до ввода шахты в эксплуатацию – 2,5 года.

Основные технико-экономические показатели отработки жилы №193 подземным способом приведены в таблице.

### Основные технико-экономические показатели

Показатель	Ед. изм.	Значение
Балансовые запасы для подземной разработки	т	35000
Потери руды	%	12,5
Разубоживание	%	12,5
Эксплуатационные запасы, в т.ч.:		
- в этаже 385/355 м	т	31500
- в этаже 355/320 м	т	3500
Режим работы рудника:		
- количество рабочих дней в году	день	125
- количество рабочих смен	смена	1
- продолжительность смены	ч	6
Годовая производительность рудника по руде	т	5000
Явочная численность персонала, в т. ч.:		
- забойных рабочих	чел.	4
- вспомогательных рабочих	чел.	2
- ИТР	чел.	1
Производительность труда забойного рабочего на очистной выемке	т/чел.-см	107
Объем ГКР	м <sup>3</sup>	6875
Себестоимость проходки 1 м <sup>3</sup> ГКР выработок	руб./м <sup>3</sup>	3248
Капитальные затраты, в т.ч.:		
- объекты поверхности	тыс. руб.	72530
- технологическое и стационарное оборудование	тыс. руб.	32000
- ГКР	тыс. руб.	18200
Срок ввода рудника в эксплуатацию	лет	2,5
Продолжительность отработки запасов:		
- этажа 385/355 м	лет	6
- этажа 355/320 м	лет	1
Удельные эксплуатационные затраты на добычу 1 т жильной массы	руб./т	2050
Валовые эксплуатационные затраты	тыс. руб.	71750
Условная цена реализации жильного кварца	руб.	7000
Выход годного кварцевого сырья	%	70
Условная прибыль до уплаты налогов	тыс. руб.	27220

При оценке открытого способа разработки в качестве аналога приняты стоимостные показатели проекта разработки жилы №2136 Уфимского месторождения кварца:

- глубина карьера – 70 м;
- генеральный угол наклона борта карьера – 30°;
- коэффициент вскрыши – 16,2 м<sup>3</sup>/т;
- себестоимость вскрыши – 120 руб./м<sup>3</sup>;
- себестоимость добычи – 105 руб./т.

Капитальные затраты составляют 20,0 млн руб., эксплуатационные – 144 млн руб., условная прибыль до уплаты налогов – 7,5 млн руб.

Кроме этого, следует принять во внимание нарушение земной поверхности и увеличение площади земельного отвода ориентировано на 15 га [29]. Также значительно возрастает нагрузка на окружающую среду.

Таким образом, сравнение с открытым способом разработки показывает экономическое и экологическое преимущество подземного способа.

### **Заключение**

Предлагаемые организация обособленного участка – шахты, в составе Кыштымского подземного рудника, и подземная геотехнология отработки жилы №193 Кузнецких месторождения обеспечивают:

- преимущество перед открытым способом добычи за счет меньших суммарных капитальных и эксплуатационных затрат;

- экономическую эффективность за счет использования производственных мощностей и инфраструктуры действующего горно-обогатительного предприятия, сезонного (летнего) режима работы шахты, временных разборных конструкций для строительства объектов поверхности, рационального способа и схемы вскрытия, самоходного технологического оборудования, системы разработки с изоляцией подземных горных работ, способа массовой отбойки распределенными скважинными зарядами;

- снижение экологической нагрузки по сравнению с открытым способом разработки за счет сокращения земельного отвода и сохранения лесного покрова территории, утилизации пустых пород от проходки в выработанном пространстве камер, использования действующего хвостохранилища.

*Работа выполнена по Госзаданию 007-00293-18-00.  
Тема №0405-2018-0015.*

### **Список литературы**

1. Яковлев В.Л. О развитии методологических подходов к исследованию проблем освоения недр // Проблемы недропользования. 2015. №2. С. 5-9.
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. 2013. №2. С.86-90.
3. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. №3. С.4-11.
4. Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Ивашов А.Н. Экономико-математическое моделирование процесса отработки группы месторождений подземным способом // Горный журнал. 2015. №12. С. 37-41.
5. Определение ценности техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, В.Ю. Заляднов, И.А. Пыталев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 5-8.
6. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 6. P. 1065–1071.
7. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. №11. С. 52-59.
8. Рославцева Ю.Г., Федорко В.П. Обоснование объемов горно-капитальных работ на карьерах, разрабатывающих малые месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №10. С. 84-88.
9. Сабянин Г.В. Экологические особенности горно-промышленного производства при освоении жильных месторождений // Экология промышленного производства. 2011. №1. С. 11-15.
10. Антонинова Н.Ю., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А. Оценка геоэкологических рисков при возобновлении эксплуатации месторождений // Проблемы недропользования. 2014. №3. С. 197-205.
11. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárik M., Kubečka K. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovce, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic // Engineering Geology. 2012. Vol. 147. P. 37-51.
12. Петров И.М. Тенденции и особенности развития мирового и российского рынков обогащаемых видов неметаллического минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. №6. С. 68-71.
13. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. Resources Policy. 2015. Vol. 46. Pp. 6-14.
14. Красильников П.А. Кварцевые жилы Кузнецких месторождения гранулированного кварца // Разведка и охрана недр. 1999. №3. С. 11-15.
15. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Götzte J.; Möckel R. (Eds.). 2012, XVI, 360 p.
16. Кравец Б.Н., Кузьмин В.Г. О состоянии производства высокочистых кварцевых концентратов на Урале. Про-

- блемы и перспективы // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. №4. С. 15-19.
17. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257. Iss. 1. P. 297–309.
  18. Рыльникова М.В., Ангелов В.А., Туркин И.С. Обоснование технологической схемы и комплекса оборудования для утилизации текущих хвостов обогащения в выработанном подземном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №9. С. 62-69.
  19. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка комбинированных геотехнологий полного цикла комплексного освоения месторождений с формированием систем управления потоками природного и техногенного сырья // Проблемы недропользования. 2014. №3. С. 105-113.
  20. Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №1. С. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9.
  21. Калмыков В.Н., Пергамент В.Х., Неугомонов С.С. Расчет параметров отбойки трещиноватых руд скважинными зарядами при системах разработки с твердеющей закладкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №1. С. 22-24.
  22. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Resource-saving technology for underground mining of high-value quartz in Kyshtym // Journal of Mining Science. 2015. V. 51. No 6. P. 1191-1202.
  23. Минералургия жильного кварца / под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
  24. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Отбойка кварца рассредоточенными скважинными зарядами при подземной добыче // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №10. С. 178-185.
  25. Пат. 2645048 Российская Федерация, МПК F42D3/04 F42D1/08. Способ массовой отбойки скальных руд / А.А. Смирнов, И.В. Соколов, К.В. Барановский, А.А. Рожков, И.В. Качалов; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИГД УрО РАН. №2017105990; заявл. 21.02.2017; опубл. 15.02.2018.
  26. Шевкун Е.Б. Лещинский А.В. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. №5. С. 116-123.
  27. Предварительное обогащение кварцевого сырья / В.С. Шемякин, С.В. Скопов, Р.В. Маньковский и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. №8. С. 74-78.
  28. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10-17.
  29. Методика определения и оптимизации параметров экологически сбалансированной подземной геотехнологии освоения железорудных месторождений / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, Ю.М. Соломеин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. №8. С. 379-390.

Поступила 05.04.18  
Принята в печать 07.05.18

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13>

## ECONOMIC FEASIBILITY OF UNDERGROUND DEVELOPMENT OF SMALL QUARTZ VEINS

**Igor V. Sokolov** – DSc (Eng.)

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

**Aleksey A. Smirnov** – PhD (Eng.)

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

**Yury G. Antipin** – PhD (Eng.)

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

**Kirill V. Baranovsky** – PhD (Eng.)

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2572-166X>

**Igor V. Nikitin** – research fellow

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

**Artem A. Rozhkov** – junior research fellow

Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3007-1099>

**Abstract**

**Problem Statement (Relevance):** The expansion of the quartz sector is possible due to the development of small quartz veins. One of the main problems that arise in this case is how to justify the development of such small-scale sites from the economical and environmental standpoints. The solution can be the use of the capacities and infrastructure of the existing mining sites provided this type of ores can be delivered to the concentrator plant. At the same time, the priority task is to justify the method of mining to be used for quartz veins. Even that the open-cut method may seem to be the one to be exploited here considering the small depth (up to 100 m) and the amount of reserves (up to 35 thousand tons), the advantages delivered by it can be offset by a relatively large amount of overburden, the need to allocate the corresponding areas of the forest land to accommodate overburden dumps, and, consequently, a significant reduction in economic and environmental efficiency. Using the case study of the vein no. 193 at the Kuznechikhinskoe granular quartz deposit, this paper provides a comprehensive feasibility study of the underground mining of a small deposit containing valuable minerals.

**Objectives:** The objectives of this research were to develop some technical solutions and substantiate the feasibility of mining small quartz veins. **Methods Applied:** Analytical and experimental studies and a feasibility study have been carried out. **Findings:** In this application, the underground mining method delivered economic and environmental advantages compared with the open-cut method. The developed underground mining technique ensures feasibility of developing the vein no. 193 at the Kuznechikhinskoe deposit provided a separate site is set up within the existing Kyshtym GOK property. The efficiency of this development is achieved through the use of efficient opening method and scheme, mobile machinery for preparatory and stoping operations, an open stope system with ore drawn through loading drifts, a method of mass breaking by decked charges, and load-haul-dump machinery for rock transportation. Because the open-cut method is not applied, the environmental impact is minimized due to reduced acquisition of land, the preservation of forest lands, the reclamation of waste rock and the use of the tailings pond by the operating concentrator plant. **Practical Relevance:** The obtained results can be useful in substantiating the growth strategy for the high-grade quartz sector, as well as in exploration and design of underground mines to develop small-scale deposits.

**Keywords:** Small deposit, granular quartz, opening method and opening scheme, mining system, decked charge.

*This research was carried out following the Public Statement of Work 007-00293-18-00. Subject no. 0405-2018-0015.*

**References**

1. Yakovlev V.L. On the development of methodological approaches to the study of subsoil development problems. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], 2015, no. 2, pp. 5-9. (In Russ.)
2. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N. Expanding the raw material base of mining enterprises through a complex use of mineral resources. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2013, no. 2, pp. 86-90. (In Russ.)
3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I. How recovery impacts the underground mining performance in the case of ore deposits. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2012, no. 3, pp. 4-11. (In Russ.)
4. Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Ivashov A.N. Economic and mathematical modeling of the processes involved in underground mining of a cluster. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 12, pp. 37-41. (In Russ.)
5. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A. et al. Estimating the value of man-made georesources. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 5-8. (In Russ.)
6. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, iss., 6. pp. 1065-1071.
7. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design principles and selection of mining techniques to ensure sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 52-59. (In Russ.)
8. Roslavtseva Yu.G., Fedorko V.P. Substantiating the scope of open-cast mining operations to develop small-scale deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 10, pp. 84-88. (In Russ.)
9. Sabyanin G.V. Ecological aspects of mining operations when developing vein deposits. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Industrial Ecology], 2011, no. 1, pp. 11-15. (In Russ.)
10. Antoninova N.Yu., Slavikovskaya Yu.O., Shubina L.A. Analysis of geo-ecological risks posed by resumed exploitation of deposits. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], 2014, no. 3, pp. 197-205. (In Russ.)
11. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárik M., Kubečka K. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic. *Engineering Geology*. 2012, vol. 147, pp. 37-51.
12. Petrov I.M. Development trends at the global and Russian markets of enriched nonmetallic minerals. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2010, no. 6, pp. 68-71. (In Russ.)
13. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*. 2015, vol. 46, pp. 6-14.
14. Krasilnikov P.A. Quartz veins of the Kuznechikhinskoe granular quartz deposit. *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and conservation of mineral resources], 1999, no. 3, pp. 11-15. (In Russ.)
15. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Götze J.; Möckel R. (Eds.). 2012, XVI, 360 p.

16. Kravets B.N., Kuzmin V.G. On the state of production of high-purity quartz concentrates in the Urals. Problems and prospects. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2011, no. 4, pp. 15-19. (In Russ.)
17. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition. *European Journal of Operational Research*. 2017, vol. 257, iss. 1, pp. 297–309.
18. Rylnikova M.V., Angelov V.A., Turkin I.S. Substantiating the process and equipment for disposal of current concentration tailings in the mined-out underground space. *Gornyi informacionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) [Mining bulletin], 2014, no. 9, pp. 62-69. (In Russ.)
19. Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Design of combined full-cycle geotechnologies for the development of deposits while setting up flow management systems to control natural and man-made raw materials. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], 2014, no. 3, pp. 105-113. (In Russ.)
20. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. *Fizicheskoe modelirovanie vzryvnoy otboiki vysokocennogo kvarca* [Physical modeling of blasting in high-grade quartz mining]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, no. 1, pp. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9. (In Russ.)
21. Kalmykov V.N., Pergament V.Kh., Neugomonov S.S. Design of deep-hole blasting process to break fractured ores when solid stowing systems are used. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 1, pp. 22-24. (In Russ.)
22. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Resource-saving technology for under-
- ground mining of high-value quartz in Kyshtym. *Journal of Mining Science*. 2015, v. 51, no. 6, pp. 1191-1202.
23. *Mineralurgiya zhil'nogo kvarca* [Mineralurgy of vein quartz]. Ed. by V.G. Kuzmin, B.N. Kravets. Moscow: Nedra, 1990, 294 p. (In Russ.)
24. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. The use of decked charges to break quartz in underground mining. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) [Mining bulletin], 2017, no. 10, pp. 178-185. (In Russ.)
25. Smirnov A.A., Sokolov I.V., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Kachalov I.V. *Sposob massovoy otboiki skal'nyh rud* [Method of mass breaking of rock ores]. Patent RF, no. 2645048, 2018.
26. Shevkun E.B., Leshchinsky A.V. The use of expanded polystyrene for decked charges. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) [Mining bulletin], 2006, no. 5, pp. 116-123. (In Russ.)
27. Shemyakin V.S., Skopov S.V., Mankovsky R.V., Krasilnikov P.A., Mamonov R.S. Preconcentration of raw quartz. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2016, no. 8, pp. 74-79. (In Russ.)
28. Sokolov I.V., Baranovsky K.V. How to choose an efficient technology for the underground development of a quartz deposit. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 10-17. (In Russ.)
29. Sokolov I.V., Gobov N.V., Solomein Yu.M., Nikitin I.V. A technique for identifying and optimizing the ecologically balanced underground geotechnology to develop iron ore deposits. *Gornyi informacionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) [Mining bulletin], 2016, no. 8, pp. 379-390. (In Russ.)

Received 05/04/18

Accepted 07/05/18

**Образец для цитирования**

Целесообразность подземной отработки малых кварцевых жил / Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 4–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13>

**For citation**

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A. Economic feasibility of underground development of small quartz veins. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 4–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13>