

УДК 622.235

**Соколов Игорь Владимирович**

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией  
подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58

**Смирнов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН

**Рожков Артем Андреевич**

младший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ОТБОЙКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО  
КВАРЦА ПЛОСКОЙ СИСТЕМОЙ  
ЗАРЯДОВ\****Аннотация:*

В статье представлены результаты экспериментальных взрывов плоской системы зарядов в условиях Кыштымского подземного рудника. Основной задачей при этом являлось снижение выхода переизмельченной фракции кварца – 20 мм.

Была предложена и опробована конструкция рассредоточенного скважинного заряда без инертного заполнителя в воздушных промежутках. Проведено сравнение гранулометрического состава отбиваемой руды при различных конструкциях зарядов. Выявлена зависимость выхода фракций кварца от удельного расхода ВВ. Доказана техническая возможность повышения эффективности добычи ценного сырья при предлагаемой технологии и параметрах буровзрывных работ. Предполагаемый эффект от перехода на новый способ отбойки – снижение выхода переизмельченной фракции на 25 - 40 %.

*Ключевые слова:* гранулированный кварц, буровзрывные работы, переизмельчение, удельный расход ВВ, плоская система зарядов, рассредоточение

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.014

**Sokolov Igor V.**

Doctor of Engineering,  
the Head of the Laboratory  
of Underground Geotechnology,  
Institute of Mining of Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
Mamina-Sibiryaka, 58

**Smirnov Alexey A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Worker  
of the Laboratory of Underground Geotechnology,  
Institute of Mining of Ural Branch of RAS

**Rozhkov Artem A.**

Junior Research Worker  
of the Laboratory of Underground Geotechnology,  
Institute of Mining of Ural Branch of RAS  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**RESULTS OF EXPERIMENTAL BREAKING  
OF GRANULAR QUARTZ  
BY FLAT EXPLOSIVES SYSTEM***Abstract:*

The article gives the results of experimental explosions of a flat explosives system in the conditions of the Kyshtym underground mine. The main task here was to reduce the outcome of the overgrinding quartz fraction – 20 mm.

The design of the dispersed hole-explosive without any inert filler in air gaps was proposed and tested. The granulometric composition of the ore being broken off by various explosives structures was compared. The dependence of the output of quartz fractions on the specific consumption of explosives is revealed. The technical possibility of increasing the efficiency of extraction of valuable raw materials with the proposed technology and parameters of drilling and blasting operations is proved. The expected effect of the conversion to a new way of breaking is to be a reducing of the outcome of the overgrinding fraction by 25 – 40 %.

*Key words:* granular quartz, drilling and blasting operations, overgrinding, specific consumption of explosives, flat system of explosives, dispersal

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания 007-01398-17-00. Тема № 0405-2015-0010. «Теоретические основы стратегии комплексного освоения месторождений и технологий их разработки с учетом особенностей переходных процессов в динамике развития горнотехнических систем»

При подземном способе добычи высокоценного гранулированного кварца актуальной научно-технической задачей является определение оптимальных параметров буровзрывных работ (БВР), позволяющих снизить выход некондиционной фракции – 20 мм с 16 – 20 % до  $\leq 14$  % и получить удовлетворительный выход негабарита +700 мм ( $\leq 10$  %).

Ранее на Кыштымском руднике применялась следующая технология БВР: веера скважин диаметром 105 мм и длиной до 10 м заряжались вручную зарядами патронированного аммонита 6ЖВ длиной 1,5 – 2 м, рассредоточенными промежутками из глины (суммарная длина последних была примерно равна суммарной длине зарядов). При линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и расстояниями между концами скважин 2 – 2,5 м удельный расход ВВ составлял в среднем 0,9 кг/м<sup>3</sup>. Применялось короткозамедленное взрывание (КЗВ). При негабарите до 10 % такой способ позволял получить выход некондиционной фракции в пределах 16 – 20 % [1]. Данный показатель неприемлем на современном этапе освоения уникального месторождения [2]. При переходе на новую технологию [3] добычи кварца отбойка руды производится веерами скважин длиной до 24 м с применением механизированного заряжения скважин гранулированным ВВ [4].

При взрыве удлиненных зарядов в горной породе основной объем разрушений приходится на зону радиальных трещин [5], необходимо стремиться к минимизации размеров данной зоны. Решить данную задачу представляется возможным, поскольку известно, что при групповом мгновенном взрывании близкорасположенных зарядов прорастает магистральная трещина, вокруг которой не происходит интенсивного дробления [6], а отрыв от массива происходит по линии расположения зарядов до того, «как успеют развиваться другие трещины» [7]. При веерном расположении скважин время образования трещин по линии отрыва значительно меньше, чем в направлении ЛНС, а с формированием общей щелевидной полости резко снижается давление газов взрыва [8].

Вышеизложенным положениям соответствует веер зарядов, взрывааемых одновременно и взаимодействующих между собой, который следует рассматривать как плоскую систему зарядов (ПСЗ) [9,10].

Также большое значение имеет конструкция зарядов. Сплошные скважинные заряды, несмотря на наибольшее распространение в практике ведения взрывных работ, наименее эффективны с точки зрения механики дробления [11]. Помимо опыта отбойки зарядами с глиняными промежутками, в 1980-е годы на месторождении проводились исследования скважинной отбойки в карьере и шпуровой при проходке разведочных выработок по кварцу. Установлено, что сплошная конструкция заряда при удельном расходе ВВ 0,9 кг/м<sup>3</sup> обязательно связана со значительным переизмельчением кварца (выход фракции 0 – 5 мм 37 %). В то же время снижение удельного расхода ВВ может привести не только к повышенному выходу негабарита, но и к «прострелу», когда слой породы не отбивается от массива. Взрывание зарядов с пористыми промежутками и стержнями позволило получить равномерное дробление массива с малым содержанием мелких фракций [12, 13].

Известно, что рассредоточение заряда позволяет снизить начальное давление взрыва к плотности энергии на единицу поверхности стенок скважины, удлиняя время воздействия взрыва на разрушаемую породу, уменьшает бризантное действие взрыва, связанное с переизмельчением материала в ближней зоне и способствуют более равномерному дроблению породы [14]. Формирование рассредоточенных зарядов производится самыми различными способами [15 – 17], имеющими как достоинства, так и недостатки, главный из которых в том, что предназначены они преимущественно для открытых горных работ. В подземных условиях возможная область их применения ограничивается зарядкой нисходящих вертикальных скважин увеличенного диаметра. При расположении скважин в виде восходящего веера данные способы не применимы либо сложно осуществимы. Таким образом, возникла необходимость в разработке конструкции рассредоточенного заряда, отвечающей горнотехническим условиям [18]. Важно отметить,

что рациональной конструкцией является заряд, разделенный именно воздушным промежутком, а не забоечным или каким-либо другим инертным материалом [19]. Также, учитывая что массив кварцевой жилы является довольно трещиноватым, а отбойка трещиноватых руд требует уменьшенного расхода ВВ [20], была предложена и опробована конструкция с воздушным промежутком без инертного заполнителя (рис. 1).

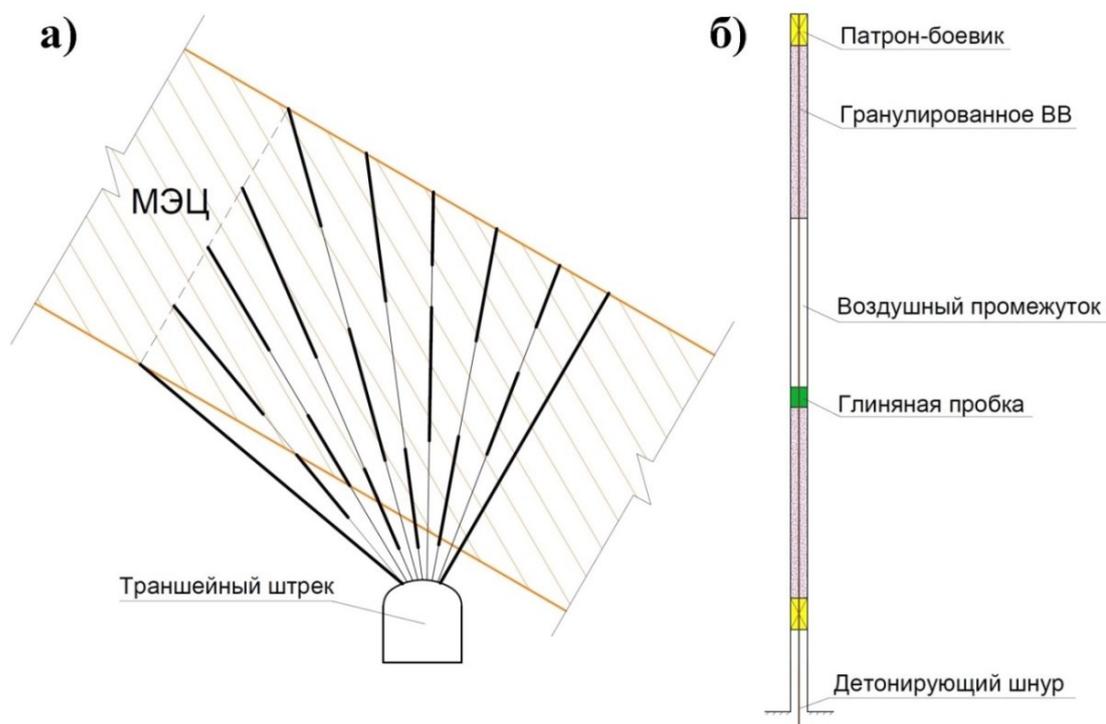


Рис. 1 – Принципиальная схема заряжения веера (а) и конструкция заряда в скважине (б)

Для оценки получаемого гранулометрического состава отбиваемой руды были применены методы ситового анализа и фотопланиметрии [21]. Выборка проб от генеральной совокупности составляла 5 % и более, что отвечает требованиям [22], а их отбор проводился погрузочно-доставочной машиной (ПДМ) по мере выпуска отбитого слоя. Замер объемов фракций после разделения осуществлялся с учетом коэффициентов разрыхления, характерных для каждой из них.

Для последующего сравнения результатов эксперимента первый взрыв производился при сплошной конструкции зарядов с параметрами: ЛНС – 1,6 и расстоянием по концам скважин – 2,2 м. При диаметре скважин 65 мм удельный расход ВВ на отбойку был  $1,55 \text{ кг/м}^3$ . Выход некондиционной фракции составил 25 % при выходе негабарита около 5 %. Тем самым был подтвержден вывод [13] о том, что сплошная конструкция заряда крайне неэффективна и не позволяет значительно снизить удельный расход ВВ.

Всего было проведено 7 экспериментальных взрывов. Из них 5 – с предложенной конструкцией и различным расходом ВВ. Было проведено сравнение между собой взрывов ПСЗ со следующими конструкциями:

- рассредоточенные заряды диаметром 65 мм (РЗ,  $d=65$  мм);
- сплошные заряды диаметром 65 мм (СЗ,  $d=65$  мм);
- рассредоточенные заряды диаметром 105 мм (РЗ,  $d=105$  мм).

Отметим, что в процессе предобогачения кварцевая руда в первую очередь разделяется на две фракции: +65 и –65 мм. Фракция +65 мм не требует дополнительных операций (негабарит вывозится на поверхность после вторичного дробления) и сразу отправляется на обогатительную фабрику, а –65 мм подвергается еще одному процессу – грохочению, с целью выделения непригодной для обогащения фракции –20 мм. Сравнение результатов (рис. 2) показало, что РЗ  $d=65$  мм позволил получить более качественное дробление, в то время как результаты СЗ того же диаметра и РЗ  $d=105$  мм значительно

хуже и сопоставимы между собой. При РЗ  $d=65$  мм доля мелких фракций  $-20$  мм и  $+20 - 65$  мм меньше в отличие от СЗ  $d=65$  мм и РЗ  $d=105$  мм (на 13 – 14 и 8 – 10 %, соответственно), а доля  $+65 - 700$  мм – значительно выше (на 15 – 20 %).

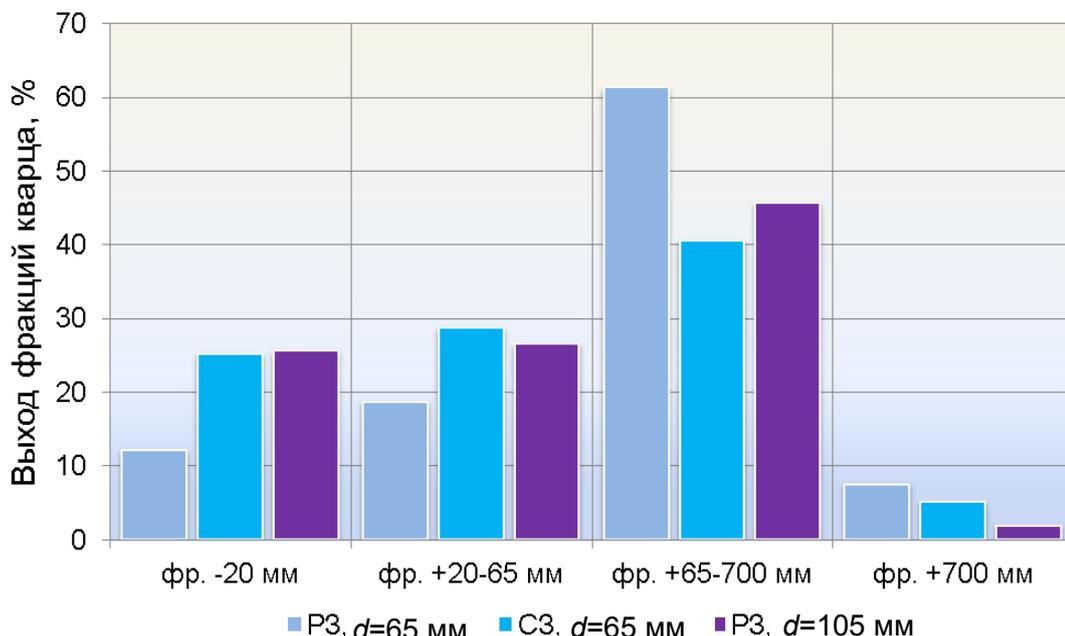


Рис. 2 – Сравнение результатов взрывов при различных конструкциях зарядов

По результатам всех экспериментальных взрывов установлена зависимость granulometric composition from specific consumption of VV (рис. 3). Выход некондиционной фракции в размере 12 % и негабаритной 7 – 10 % достигается при удельном расходе ВВ на отбойку около  $0,9 \text{ кг/м}^3$ . По сравнению с ранее применяемой технологией БВР, где удельный расход ВВ также был  $0,9 \text{ кг/м}^3$ , доказана возможность снижения переизмельчения на 25 – 40 %.

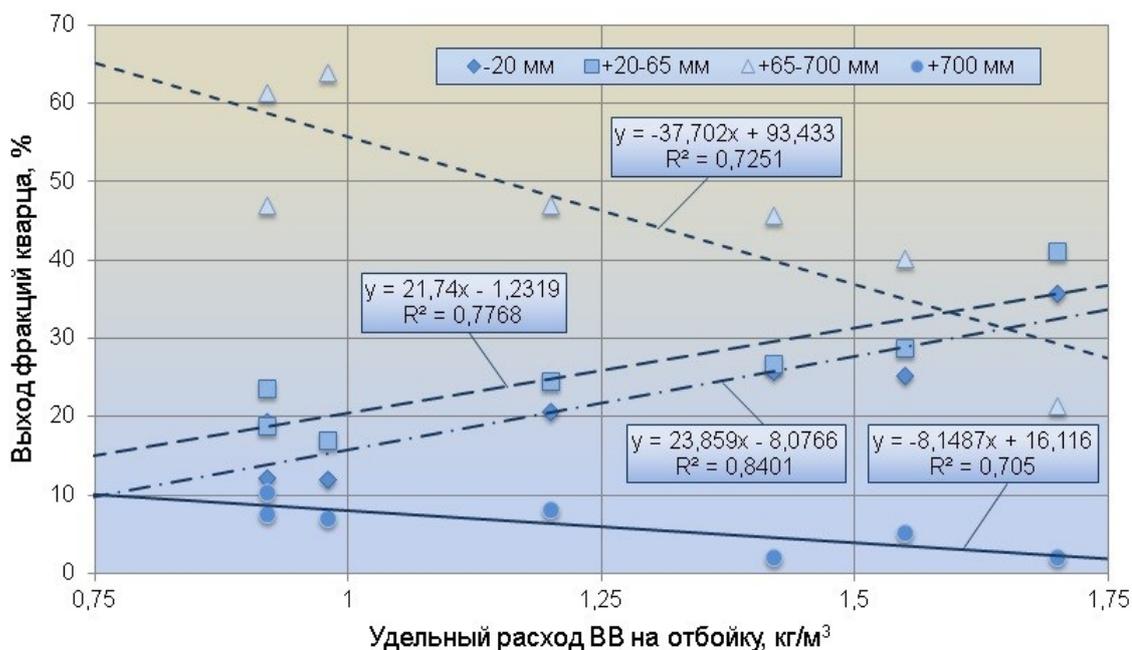


Рис. 3 – Зависимости выхода фракций кварца от удельного расхода ВВ

Вместе с тем картина разрушения массива взрывом веерных зарядов (рис. 4) показала, что происходит откол слоя по плоскости расположения скважин. Следовательно, можно утверждать, что заряды в веере действительно взаимодействуют между собой по

плоскости своего расположения, т.е. как ПСЗ. Идентичную картину можно наблюдать при контурном взрывании [23], что лишь подтверждает эффект взаимодействия зарядов, отличный от такового при КЗВ. Четкие следы скважин на кусках отбитой руды (рис. 4а) и груди забоя в камере (рис. 4б) наглядно показывают, что зоны мелкого дробления вокруг зарядов минимальны [24].



Рис.4 – Откол слоя по плоскости расположения скважин:  
а) на поверхности; б) в камере

Основные выводы по результатам проведенных исследований:

1. Применение плоской системы рассредоточенных зарядов с минимально необходимыми для отрыва энергетическими показателями может обеспечить снижение выхода переизмельченной фракции с 16 – 20 % до 12 % (на 25 – 40 %).
2. При взрыве плоской системы рассредоточенных зарядов не происходит интенсивного дробления кварца в ближней зоне взрыва, в том числе непосредственно вокруг зарядов. Данный факт позволяет предположить, что величина выхода мелкой фракции в основном определяется интенсивностью удара отбитого слоя о стенки и днище камеры,

зависящей от мощности взрыва, т.е. от удельного расхода ВВ. Снижение удельного расхода ВВ до  $0,9 \text{ кг/м}^3$  достигается конструкцией зарядов с воздушными промежутками и ограничено выходом негабарита (7 – 10 %).

Материалы, представленные в статье, являются основой для дальнейших исследований и последующей формализации действия ПСЗ в виде веера на массив гранулированного кварца.

### Литература

1. Соколов И.В. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, А.А. Рожков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 337 - 350.
2. Минералургия жильного кварца / Под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. – М.: Недра, 1990. – 294 с.
3. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 46 - 50. DOI:10.17580/gzh.2017.07.08
4. Выбор оптимального варианта комбинированной системы разработки месторождения высокоценного кварца на основе моделирования / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков // ФТПРПИ. – 2016. – № 6. – С. 124 - 133.
5. Шер Е.Н. Форма и размеры радиальных трещин, образующихся при взрыве двух сближенных скважинных зарядов / Е.Н. Шер // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – С. 250 – 255.
6. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 1. Разрушение горных пород взрывом / Б.Н. Кутузов. – М.: Изд-во МГГУ, 2009. – 471 с.
7. Сенук В.М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массива крепких пород при взрывной отбойке / В.М. Сенук // ФТПРПИ. – 1979. – № 1. – С. 28 - 34.
8. Ерофеев И.Е. Повышение эффективности буровзрывных работ на рудниках / И.Е. Ерофеев. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
9. Соколов И.В. Отбойка кварца рассредоточенными скважинными зарядами при подземной добыче / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, А.А. Рожков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10. – С. 178 - 185.
10. Горинов С.А. Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях / С.А. Горинов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1985. – № 7. – С. 68 - 73.
11. Жариков И.Ф. Энергосберегающие технологии ведения взрывных работ на разрезах / И.Ф. Жариков // Взрывное дело. - 1998. - № 91/48. - С. 191 - 195.
12. Берсенев Г.П. Управление качеством взрывного дробления горных пород на нерудных карьерах: дис. ... канд. техн. наук / Г.П. Берсенев; Ин-т горного дела. - Свердловск, 1989. - 158 с.
13. Кутузов Б.Н. Анализ дробящего действия зарядов ВВ с пористым промежутком / Б.Н. Кутузов, В.А. Безматерных, Г.П. Берсенев // Изв. вузов. Горный журнал. - 1988. - № 1. - С. 53 – 58.
14. Шевкун Е.Б. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом / Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 5. – С. 116 - 123.
15. Ломоносов Г.Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений / Г.Г. Ломоносов. – 2-е изд. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – 517 с.
16. Лещинский А.В. Рассредоточение скважинных зарядов / А.В. Лещинский, Е.Б. Шевкун. - Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. – 154 с.

17. Гришин А.Н. Способ формирования рассредоточенных скважинных зарядов / А.Н. Гришин, В.А. Матренин, С.В. Мучник // Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 55 - 57.
18. Барановский К.В. Влияние горно-геологических факторов на эффективность подземной отработки наклонных залежей средней мощности / К.В. Барановский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S11. – С. 288 - 293.
19. Марченко Л.Н. Исследование процессов образования и развития трещин в твёрдых средах в зависимости от конструкции заряда / Л.Н. Марченко // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 102 – 113.
20. Калмыков В.Н. Расчет параметров отбойки трещиноватых руд скважинными зарядами при системах разработки с твердеющей закладкой / В.Н. Калмыков, В.Х. Пергамент, С.С. Неугомонов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2009. - № 1. - С. 22 - 24.
21. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения / Л.И. Барон. – М.: ИГД АН СССР, 1960. – 124 с.
22. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле / П.А.Рыжов. – М.: Высшая школа, 1973. – 287 с.
23. Бротанек И. Контурное взрывание в горном деле и строительстве / И. Бротанек, Й. Вода. Пер. с чеш. Под ред. проф. д-ра техн. наук Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1983. – 144 с.
24. Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, А.А. Рожков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2017. - Т.15. - №1. - С. 4 - 9. DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9