© Н.Г. Барнов, В.А. Еременко, А.С. Кондратенко, 2016

УДК 622.831;
622.2;
622.235

Н.Г. Барнов, В.А. Еременко, А.С. Кондратенко

ОТБОЙКА СФОРМИРОВАННЫХ ГИДРОВЗРЫВОМ БЛОКОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ ЗАРЯДАМИ ВВ С ЭФФЕКТОМ ДЕКАПЛИНГА*

Для сохранения рубинов в условиях применения технологии гидроразрыва при освоении коренных месторождений корунда камерно-столбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных разрывом блоков с сохранением их целостности.

Ключевые слова: гидроразрыв, трещина, взрывчатое вещество ВВ, заряд ВВ, декаплинг, зоны нарушенности пород ЗНП, выработка, блок, шпур.

При взрывной отбойке руды, содержащей корунды (рубины) с помощью шпуровых зарядов происходит разрушение корундового геоматериала – более 90% от общего объема [1–6]. Также основная часть корундов разрушается при быстром разупрочнении – переходе горных пород и корундов из напряженного состояния в разгруженное, происходит разрушение крупных кристаллов и образование в них трещин.

Наиболее приемлемым вариантом отбойки руды для данных условий является способ, при котором массив не подвержен воздействию взрыва или механическим ударам. Для сохранения целостности рубинов в качестве альтернативы существующим технологиям взрывной отбойки в настоящее время разрабатываются параметры геотехнологии освоения коренных месторождений корунда, которые осваиваются в сложных условиях высокогорья, технологические схемы и технические средства гидроразрыва горных пород [1].

Гидроразрыв позволяет только разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения [7–9]. Для отбойки сформированных блоков необходимо провести

* Работа выполнена в рамках государственного контракта Российского научного фонда – грант № 14-37-00050.

максимально щадящий взрыв на дне центрального шпура или дополнительно нескольких шпуров, взрывная волна которого раскроет трещины гидроразрыва и отбросит блоки на некоторое расстояние на почву очистной ленты, слоя или выработки (рис. 1). Рекомендуется проводить отбойку блоков зарядами ВВ с использованием эффекта декаплинга [10, 11]. При этом достигается снижение сейсмического воздействия взрыва на массив горных пород за счет неполного заполнения шпуров ВВ по длине и сечению, а также снижение плотности ВВ, т.е. нарушается прямая связь межу зарядом ВВ и разрушаемым массивом горных пород. Соприкосновение заряда ВВ со стенками шпура производит связанный взрыв (обычное взрывание) (рис. 2), а при наличии, например, воздушного промежутка между стенками шпура и оболочкой заряда ВВ позволяет существенно снизить сейсмическое действие взрыва, так как возникает эффект декаплинга. При декаплинге ударная волна неоднократно отражается от стенок полости, оставаясь запертой внутри, и значительно меньше энергии отдается сейсмическим возмущениям массива горных пород. Декаплинг считается полным, если размеры полости и давление в ней таковы, чтобы ударная волна, не разрушая полости, приводила только к упругим их деформациям [10]. Если же возникают пластические деформации, сокрытие будет частичным. Для качественного создания эффекта декаплинга при взрыве зарядов ВВ рекомендуется покрывать стенки шпуров специальными материалами или при-

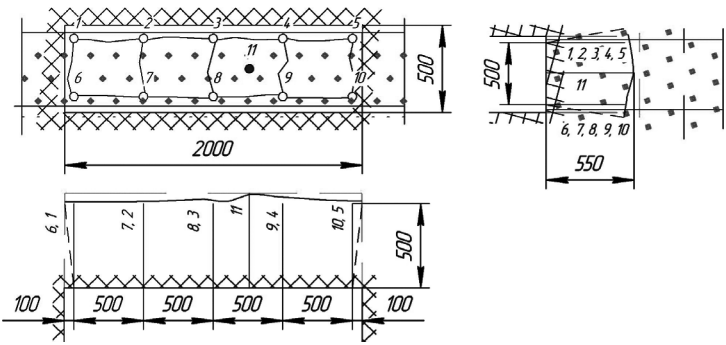

Рис. 1. Параметры бурогидровзрывных работ (паспорт БГВР): 1–10 – шпуры продольного гидроразрыва; 11 – центральный шпур поперечного гидроразрыва, а также для проведения сотрясательного взрыва заряда ВВ с использованием эффекта декаплинга; 2000, 500 мм – ширина и высота очистной ленты; 500 мм – длина шпуров продольного гидроразрыва; 550 мм – длина центрального шпура

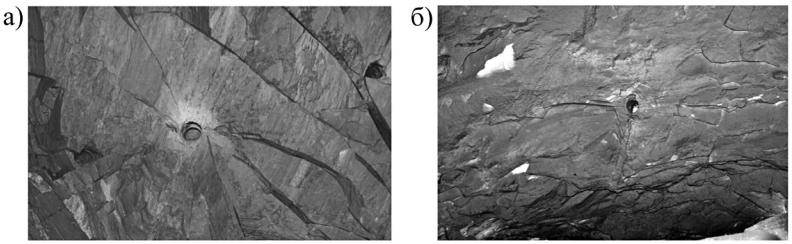

Рис. 2. Зона нарушенных взрывом ВВ горных пород при проходке выработок на руднике Cuiaba в Бразилии и Зум-Холбинском в Бурятии с визуально наблюдаемыми техногенными трещинами в радиусе более 300 мм

менять при формировании зарядов инертные промежутки и забойку шпуров, например, минеральные ампулы.

Проведение обычных взрывов шпуровых зарядов ВВ при проходке выработок или отработке очистных лент создает зоны разрушенных взрывом горных пород — зоны нарушенности пород ЗНП, которые представляют собой сеть трещин размером от микро- до макроскопических, в сочетании с радиальным растрескиванием (рис. 2, 3), особенно при использовании мощных ВВ, например, Игданита. Несоблюдение проектных параметров БВР, применение мощных ВВ, отказ от контурного взрывания, недостаточная изученность физико-механических свойств горных пород приводит к увеличению сечения выработок и очистных лен, а также нарушает целостность сформированных гидроразрывом блоков. Например, при проходке подготовительной

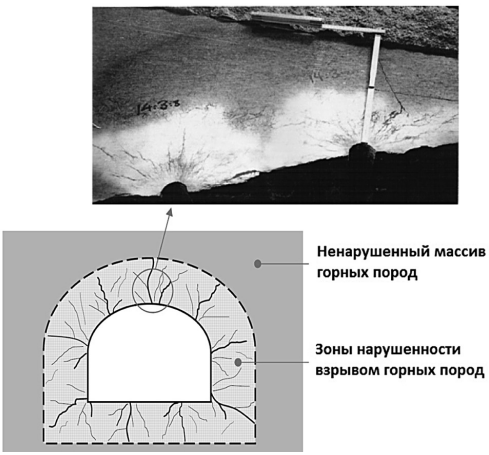

Рис. 3. Микро- и макроскопические трещины в зоне нарушенных взрывом ВВ горных пород

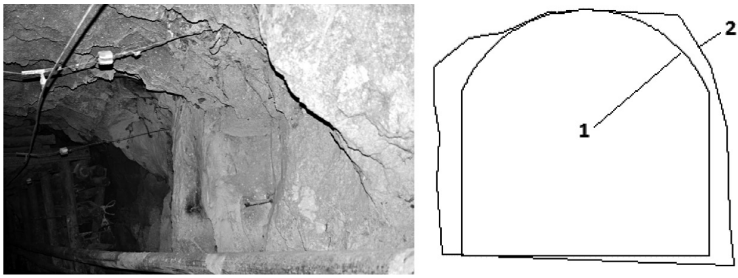

Рис. 4. Нарушение сечения подготовительной выработки: 1 – проектное сечение; 2 – существующее сечение

выработки на одном из рудников в Восточной Сибири визуально наблюдалось изменение проектного сечения выработки: 2,6×2,8 м (рис. 4). Подвигание забоя за цикл составляло – 1,5 м. При соблюдение проектных параметров объем отбитой горной породы составлял 10 м^3 массой 27 т. Но из-за увеличения сечения выработки на 15% масса отбитой горной породы возросла до 31 т. Горной породы массой 4 т оказалась сверх нормы на одном цикле проходки. Возникли издержки при погрузке и транспортировке незапланированного объема, потребовалось дополнительное время. На рис. 5 представлен эмпирический график, который показывает, как возрастает площадь увеличения сечения выработки при различной длине подвигания забоя, которая зависит от радиуса зон нарушения горных пород взрывом ($R_{знп}$ = 10÷40 см). При увеличении площади сечения выра-

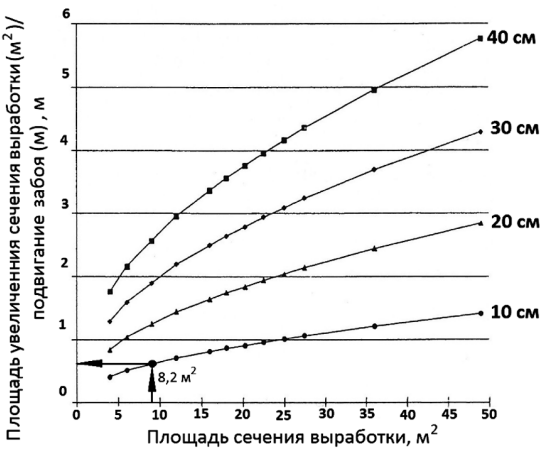

Рис. 5. Зависимость площади увеличения сечения выработки при различной длине подвигания забоя, от радиуса зон нарушенности горных пород взрывом ($R_{знп}$ = 10÷40 см)

ботки на 15% до 8,2 м², возрастает объем оборки горной породы и транспортировки на 0,6 т на 1 п.м. проходки (1 т на 1,5 п.м. проходки) при $R_{знп}$ = 10 см.

При проведении экспериментальных исследований разработаны параметры бурогидровзрывных работ. За основу взяты параметры очистных лент (забоев) отработки горизонтальных и пологопадающих, тонких и маломощных жил камерно-столбовой системой разработки [12, 13], наиболее подходящей для

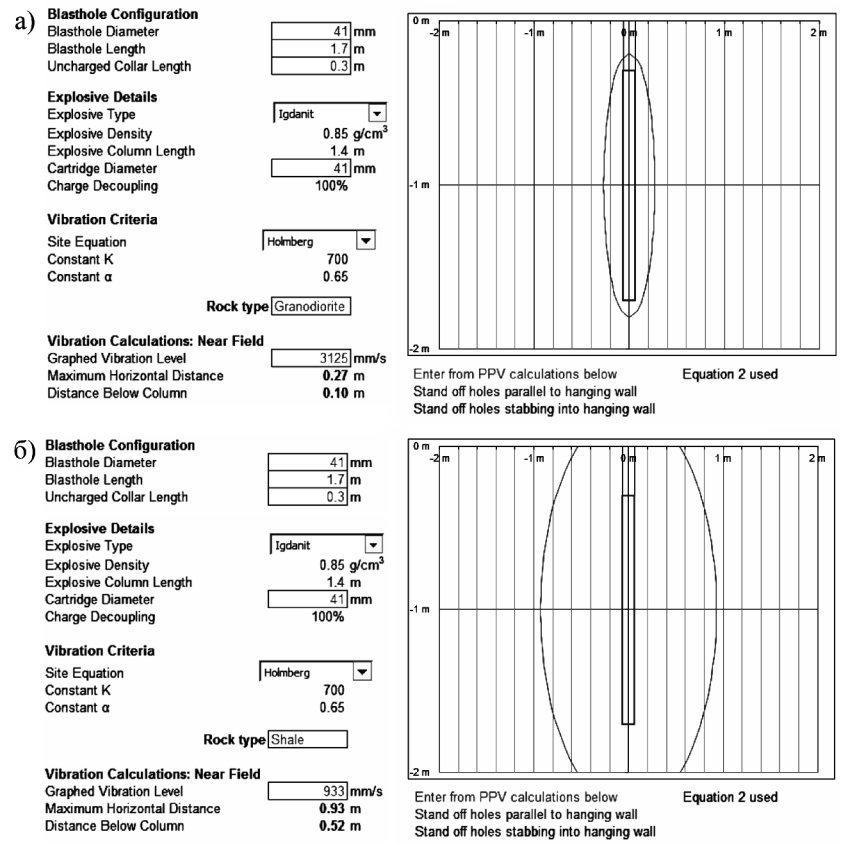

Рис. 6. Радиус ЗНП при взрывание шпурового заряда ВВ (Игданита) в крепких породах гранодиоритах $R_{знп}$ = 0,27 м (а) и слабых сланцах $R_{знп}$ = 0,93 м (б): Blasthole diameter – диаметр шпура (41 мм); Blasthole length – длина шпура (1,7 м); Explosive density – плотность ВВ (Игданита) (0,85 г/см³); Cartridge diameter – диаметр патрона (41 мм); Charge decoupling – декаплинг заряда (100%); Graphed vibration level – уровень колебаний в ближней зоне (в гранодиоритах – 3125 мм/с, в сланцах – 933 мм/с)

данных условий разработки корундовых месторождений, расположенных в горах на высоте более 2 км [1].

Для раскрытия трещин гидроразрыва и отбойки сформированных блоков проводится щадящий взрыв с эффектом декаплинга на дне центрального шпура или при необходимости в нескольких дополнительных шпурах. Энергия взрыва обычных шпуровых зарядов ВВ повреждает целостность сформированных гидроразрывом блоков руды или снижает их прочность. В результате возникают новые трещины, плоскости ослабления и напластования, которые были непроницаемы до взрыва, и целостность кондиционного куска нарушается. При этом происходят значительные потери корундового геоматериала, увеличивается разубоживание руды и объемы транспортировки, повышаются требования к креплению выработок и устойчивости горных пород. С помощью специальных методов взрывания, например, предварительного расщепления (раскалывания) взрывом массива по трещинам гидроразрыва сохраняется целостность кондиционных кусков руды. Правильно организованный и проведенный щадящий взрыв позволяет сократить: объемы увеличения сечения выработок, очистной ленты и транспортируемой породы; расходы на крепление выработок и очистного пространства; время и стоимость оборки выработок и установки крепи.

При щадящем взрывании больший эффект достигается в крепких породах и в залежах с горизонтальных напластованием, с минимальным повреждением массива горных пород разломами и природными трещинами (рис. 6, *а*). В несвязных, выветрелых, сильно трещиноватых породах наиболее сложно получить качественный гидроразрыв и достигнуть необходимого эффекта при взрыве (рис. 6, *б*). Схемы расположения шпуров и массу зарядов ВВ необходимо менять в зависимости от свойств горных пород и структурной нарушенности. То, что работает в крепких породах, непригодно в слабых и сильнотрещиноватых массивах (рис. 6).

Щадящий взрыв с эффектом декаплинга минимизирует негативное влияние на состояние сформированных гидроразрывом блоков при отработке очистных лент при камерно-столбовой системе разработки и возмущение примыкающего породного массива с помощью следующих технически решений: уменьшения энергии взрыва на метр шпура; сокращения количества шпуров в которых размещаются заряды ВВ; неполной зарядки щпура; внутри контура взрыва бурятся дополнительные шпуры для поперечного гидроразрыва и проведения щадящего взрыва;

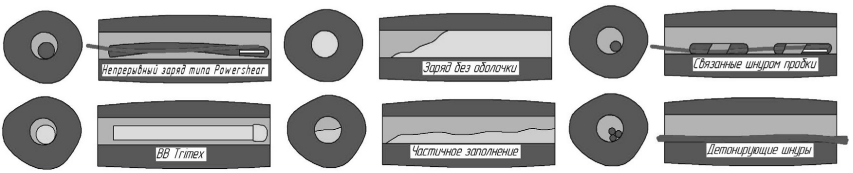

Рис. 7. Заряды ВВ для щадящего взрыва с использованием эффекта декаплинга

детонация зарядов ВВ производится с замедлением для получения свободной поверхности и максимального угла отрыва.

Для достижения большего эффекта щадящего взрыва необходимо уменьшить энергоемкость ВВ на метр шпура (рис. 7). Например, ВВ типа Игданит имеет слишком высокую мощность, однако смесь ВВ типа Impact и Игданит может эффективно применяться в условиях сухих пород. В обводненных породах рекомендуется использовать патронированные ВВ, соединенные трейсерами 10 г/м или другими детонирующими шнурами подходящей мощности, в случае если диаметр патрона намного меньше диаметра шпура.

Масса ВВ и разнесение зарядов ВВ в шпурах при щадящем взрыве обуславливаются типом горной породы, поэтому для определения их параметров необходимо провести тестовые взрывания. Для патронированных зарядов ВВ обычно необходима забойка, например, минеральными ампулами, глиной или подходящими пробками для удержания энергии взрыва и предотвращения выдавливания заряда при малых замедлениях. Оптимальный вариант, при котором заряды ВВ при щадящем взрыве следует инициировать одновременно для обеспечения равномерного разрушения массива по трещинам гидроразрыва. В практике эффективного результата достигают путем инициирования

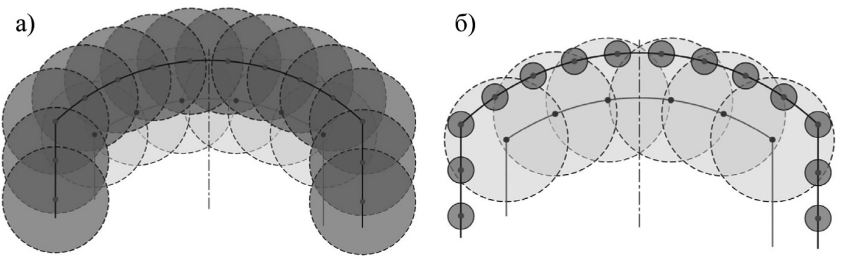

Рис. 8. ЗНП диаметром 900 мм при взрывании шпуровых зарядов ВВ Игданита ∅ 45 мм (а) и 200 мм при взрывании ВВ типа Econotrim ∅ 21 мм в шпурах ∅ 45 мм (б)

групп зарядов ВВ с равными замедлениями с обеспечением соответствующей свободной поверхности.

ЗНП, примыкающая к шпуру, представляет собой кольцо, в котором механические колебания пород превышают 1400 мм/с, что соответствует уровню трещинообразования [14]. В качестве примера для сравнения представлен контур ЗНП при взрывании шпуровых зарядов ВВ (Игданита) ∅ 45 мм (рис. 8, *а*) и зарядов ВВ типа Econotrim (изолированное патронированное ВВ) ∅ 21 мм в шпурах ∅ 45 мм (рис. 8, *б*). В первом случае диаметр ЗНП вокруг шпура составил в среднем 900 мм, во втором – 200 мм.

Для уменьшения нарушения сформированных гидроразрывом кондиционных блоков корундосодержащей руды также рекомендуется при проведении щадящих взрывов снижать линейную плотность заряда ВВ на метр шпура. Плотность ВВ можно снизить путем добавления к нему гранулированного полистирола. В качестве альтернативы используется патронированные ВВ с эффектом декаплинга, поставляемые специализированными производителями (рис. 7). При проведении исследований на горнодобывающих предприятиях параметров щадящего взрыва с помощью ВВ различной плотности установлено, что наиболее качественный результат получен при взрывании патронированных ВВ с эффектом декаплинга, а также комбинированного ВВ при соотношении компонентов смеси 50/50, например, Игданита и гранулированного полистирола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барнов Н. Г.*, *Еременко В. А.*, *Кондратенко А. С.*, *Тимонин В. В.* Обоснование параметров геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 41–46.

2. *Bowersox G. W.*, *Chamberlin B. E.* Gemstones of Afghanistan. USA, Tueson: Geoscience Press, 1995, pp.180.

3. *Gübelin E. J.* Die Edelsteinvorkommen Pakistans: 1. Die Rubine aus dem Hunzatal. 1982, V. 7, № 5, pp. 19–31.

4. *Harding R. R.*, Scarratt K. A description of ruby from Nepal // Journal of Gemmology, 1986, V. 20, № 1, pp. 3–10.

5. *Hughes R. W.* Raby & sapphire. Boulder, Colorado, USA. 1997. P. 511.

6. *Геология* и полезные ископаемые Афганистана, т. 2. – М.: Недра. – 1980. – 335 с.

7. *Курленя М. В.*, *Клишин В. И.* Создание оборудования для дегазации угольных пластов на принципе гидроразрыва горных пород // Уголь. – 2011. – № 10. – С. 34–38.

8. *Леконцев Ю. М.*, *Сажин П. В.* Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5 – С. 137–142.

9. *Курленя М. В.*, *Леонтьев А. В.*, *Попов С. Н.* Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // ФТПРПИ. – 1994. – № 1. – С. 3–20.

10. *Броуд Г. Л.* Еще о ядерных взрывах в подземных полостях // Расчеты взрывов на ЭВМ. Подземные взрывы: Сборник статей / Под ред. Г. Броуда. – М.: Мир, 1975. – С. 68–103.

11. *Справочник* взрывника / Под ред. Б. Н. Кутузова, В. М. Старобогатова, И. Е. Ерофеева и др. / М.: Недра, 1988. – 511 с.

12. *Еременко В. А.*, *Лушников В. Н.*, *Сэнди М. П.*, *Шелухин И. С.* Оценка состояния массива горных пород кровли очистных блоков в условиях применения камерно-столбовой системы в криолитозоне // Горный журнал. – 2015. – № 3. – С. 24–32.

13. *Галченко Ю. П.*, *Сабянин Г. В.* Проблемы геотехнологии жильных месторождений. – М.: Изд-во «Научтехлитиздат», 2011. – 367 с.

14. *Louchnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P.* Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs // Eurasian Mining. – 2014. – № 1. – С. 54–62. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Барнов Николай Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, ИМГРЭ, e-mail: barnov@inbox.ru,
Еременко Виталий Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: eremenko@ngs.ru,
Кондратенко Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, временно исполняющий обязанности директора ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала.

UDC 622.831; 622.2; 622.235

N.G. Barnov, V.A. Eremenko, A.S. Kondratenko

BLASTING OF HYDROFRACTURING-PRECONDITIONED BLOCKS WITH DECOUPLED EXPLOSIVE CHARGES

Aiming to preserve integrity of rubies extracted with from primary deposits using room-and-pillar method with hydraulic fracturing, the authors discuss scenarios of moderate blasting with decoupled explosive charges meant to keep unbroken blocks preconditioned by fracking.

Hydraulic fracturing process splits rock mass into blocks and destresses it. To break-off preconditioned blocks, it is required to carry out very moderate, tender blasting at the bottom of a central blasthole or additionally drilled blastholes so that blast wave widens hydorfractures and throws blocks at a certain distance on the floor of a panel or roadway. It is recommended to use decoupled explosive charges. In this case, the seismic effect of blasting on rock mass is reduced owing to incomplete fill of blasthole through the length and cross-section, as well as due to lower density of explosive; thus, the direct connection between explosive charge and rock mass is broken.

Ordinary blasting, especially with high power explosives, creates damaged rock zones that are patterns of micro- to macroscopic cracks coupled with radial spalling. Noncompliance with the design blasting pattern, use of high power explosive, neglect of controlled perimeter blasting and poor knowledge on physico-mechanical properties of rocks result in that excavations and panels suffer from too large cross-section after blasting and blocks preconditioned by hydraulic fracturing are damaged.

It is found that moderate blasting with decoupled charges minimizes aggravating effect on fracking-preconditioned blocks in room-and-pillar mining and mitigates disturbance of surrounding rock mass using the following engineering solutions: reduced energy of explosion per meter of blasthole; reduced number of blastholes to be charged; incomplete fill of blastholes; additional hole drilling inside the blast pattern to implement transverse hydraulic fracturing and moderate explosion; delayed detonation of explosive charges to produce free surface and maximum block separation angle.

The experimental investigation of moderate blasting with different density explosives in mines has shown that the highest quality is achieved with encapsulated decoupled explosive charges and with a compound explosive composed of Igdanite and polystyrene granules, for example, at a mix ratio 50/50.

AUTHORS

Barnov N.G., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher,
e-mail: barnov@inbox.ru, Institute of Mineralogy, Geochemistry
and Crystal Chemistry of Rare Elements, 121357, Moscow, Russia,
Eremenko V.A., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: eremenko@ngs.ru, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
Kondratenko A.S., Candidate of Technical Sciences, Acting Director,
Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia.

REFERENCES

1. Barnov N.G., Eremenko V.A., Kondratenko A.S., Timonin V.V. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 11, pp. 41–46.

2. Bowersox G.W., Chamberlin B.E. *Gemstones of Afghanistan*. USA, Tueson: Geoscience Press, 1995, pp.180.

3. Gübelin E.J. *Die Edelsteinvorkommen Pakistans*: 1. Die Rubine aus dem Hunzatal. 1982, V. 7, № 5, pp. 19–31.

4. Harding R.R., Scarratt K. A description of ruby from Nepal. *Journal of Gemmology*, 1986, V. 20, № 1, pp. 3–10.

5. Hughes R.W. *Raby & sapphire*. Boulder, Colorado, USA. 1997. P. 511.

6. *Geologiya i poleznye iskopaemye Afganistana*, t. 2 (Geology and minerals of Afghanistan, vol. 2), Moscow, Nedra, 1980, 335 p.

7. Kurlenya M.V., Klishin V.I. *Ugol'*. 2011, no 10, pp. 34–38.

8. Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 5, pp. 137–142.

9. Kurlenya M.V., Leont'ev A.V., Popov S.N. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1994, no 1, pp. 3–20.

10. Broud G.L. *Raschety vzryvov na EVM. Podzemnye vzryvy*: Sbornik ctatey. Pod red. G. Brouda (Computer calculation of explosions. Underground explosions. Collected works. Broud G.L. (Ed.)), Moscow, Mir, 1975, pp. 68–103.

11. *Spravochnik vzryvnika*. Pod red. B.N. Kutuzova, V.M. Starobogatova, I.E. Erofeeva (Shot-Firer's Manual. Kutuzov B.N., Starobogatov V.M., Erofeev I.E. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1988, 511 p.

12. Eremenko V.A., Lushnikov V.N., Sendi M.P., Shelukhin I.S. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 3, pp. 24–32.

13. Galchenko Yu.P., Sabyanin G.V. *Problemy geotekhnologii zhil'nykh mestorozhdeniy* (Problems of geotechnology for vein deposits), Moscow, Izd-vo «Nauchtekhlitizdat», 2011, 367 p.

14. Louchnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M.P. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs. *Eurasian Mining*. 2014, no 1, pp. 54–62.