

# Исследования техногенного воздействия взрывного разрушения горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом

В.Н. Захаров, Н.Н. Ефремовцев✉, В.С. Федотенко

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

✉ noee7@mail.ru

**Резюме:** Актуальность исследований обусловлена увеличением объемов горных работ вблизи населенных пунктов и производственной инфраструктуры, увеличением единичной мощности выемочного и транспортного оборудования и соответственно ростом объемов одновременно взрываемой и подготовленной к выемке горной массы. Проведен анализ изменения горнотехнических условий разработки на предприятиях АОА «УК «Кузбассразрезуголь». Представлен краткий анализ исследований, посвященных различным факторам, влияющим на степень техногенного воздействия взрывных работ. Одним из путей безопасного увеличения объемов одновременно взрываваемой горной массы является внедрение энергосберегающих экологически безопасных технологий производства и применения пластичного взрывчатого вещества, обеспечивающих повышение полноты химических преобразований и коэффициента полезного действия взрыва за счет применения в составах гранулированных промышленных взрывчатых веществ вместо дизельного топлива специальных топливных смесей, содержащих поверхностно-активные вещества, увеличивающих на несколько порядков площадь контакта топлива и окислителя, стабильность и энергоемкость зарядов взрывчатого вещества (ВВ) при нулевом кислородном балансе. Снижение расхода ВВ, энергоемкости добычи, техногенного воздействия взрывных работ на окружающую среду сейсмического действия взрыва, радиуса опасной зоны может быть достигнуто за счет применения для дробления обводненных и необводненных массивов зарядов, размещенных в рукавах с переменным диаметром. В статье приведены зависимости изменения нагрузки на атмосферу при увеличении расстояния от эпицентра взрыва и массы одновременно взрываемого ВВ на открытых горных работах, зависимость выхода мелких фракций от величины зазора между зарядом и зарядной полостью.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, открытые горные работы, производительность оборудования, техногенное воздействие взрывного разрушения, горные породы, конструкция зарядов, выход мелких фракций

**Благодарности:** Исследования проведены в рамках мероприятия №1 комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. №1144-р и соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с п. 4 ст. 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1185 от 28 сентября 2022 г.

**Для цитирования:** Захаров В.Н., Ефремовцев Н.Н., Федотенко В.С. Исследования техногенного воздействия взрывного разрушения горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом. *Горная промышленность*. 2022;(6):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-61-68>

## Research into man-made impact of rock blasting in surface mining of mineral deposits

V.N. Zakharov, N.N. Efremovtsev✉, V.S. Fedotenko

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ noee7@mail.ru

**Abstract:** The topicality of this research is defined by the increasing volume of mining operations near settlements and production infrastructure, as well as by the increasing unit capacity of mining and haulage equipment and, consequently, by the growing volume of rock mass simultaneously blasted and prepared for excavation. Changes in the mining conditions at the operations of UK Kuzbassrazrezugol JSC have been analyzed. A brief analysis of research results on various factors affecting the degree of man-made impact of the blasting operations is presented. One of the ways to safely increase the volume of simultaneously blasted rock mass is the introduction of energy-saving environmentally friendly technologies in production and use of plastic explosives, which would ensure higher completeness of chemical transformations and the efficiency of the blast through the use of special fuel mixtures containing surfactants instead of diesel fuel in the compositions of granular industrial explosives. This will increase the contact surface area of the fuel and the oxidizer by several orders of magnitude as well as the stability and the energy-output ratio of the blasting charges with the zero oxygen-combustible balance. Reducing the consumption of explosives,

energy intensity of mining, the man-made impact of blasting operations on the environment, the seismic action of the blast, the radius of the hazardous zone - all of this can be achieved by using charges placed in hoses of variable diameter when blasting wet and dry rock masses. The article shows the dependence of changes in the load on the atmosphere with increasing distance from the blast epicenter and with increasing weight of simultaneously detonated explosives in surface mining operations, as well as the dependence between the yield of fines and the size of the gap between the charge and the charging chamber.

**Keywords:** drilling and blasting operations, surface mining, equipment capacity, man-made impact of blasting, rocks, charge design, yield of fines

**Acknowledgements:** The research was performed as part of Activity No.1 of the Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation as of May 11, 2022, and Agreement No. 075-15-2022-1185 as of September 28, 2022, on providing grants from the federal budget in the form of subsidies in accordance with Item 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation.

**For citation:** Zakharov V.N., Efremovtsev N.N., Fedotenko V.S. Research into man-made impact of rock blasting in surface mining of mineral deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-61-68>

**Введение**

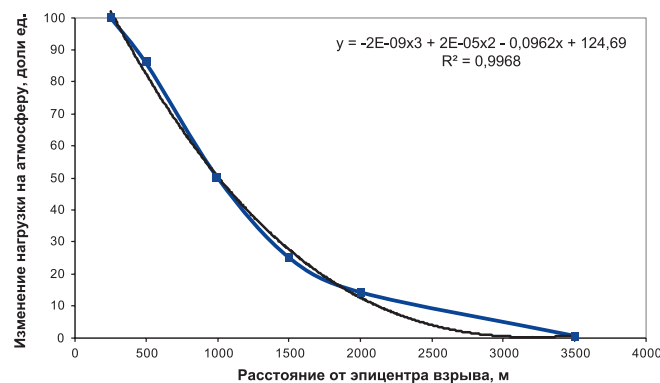
Актуальность исследований обусловлена, с одной стороны, ужесточением требований к экологическим последствиям горного производства, увеличением объемов горных работ вблизи населенных пунктов и производственной инфраструктуры, сокращением расстояния от населенных пунктов до участков производства взрывных работ, а с другой стороны, ростом единичной мощности выемочного и транспортного оборудования и соответственно необходимостью увеличения объемов одновременно взрываемой и готовой к выемке горной массы. Анализ тенденций изменения горнотехнических условий разработки и особенностей технического перевооружения на открытых горных работах за 15 лет на предприятиях АО «УК «Кузбассразрезуголь» приведен в работе [1]. Глубина открытых горных пород в среднем возросла на 40 м – до 227 м. Увеличилась крепость вскрышных пород, дальность транспортирования. Все это обусловило целесообразность ускоренного технического перевооружения выемочно-погрузочного оборудования и горнотранспортной техники. Средняя вместимость ковша экскаваторов возросла на 3,6 м³ – до 13,2 м³, и соответственно увеличилась средняя годовая производительность экскаваторов на 510,3 тыс. м³ (26,7 %) – до 2418,7 тыс. м³. При этом объем работ, выполняемых гидравлическими экскаваторами, с 2005 по 2015 г. на вскрышных и добычных работах возрос соответственно на 12,7 и 27,6%. Эффективная работа гидравлических экскаваторов требует более интенсивного дробления горной массы с увеличенным на 4–15% удельным расходом ПБВ по сравнению с требованиями к подготовке горной массы для экскавации с применением прямых механических лопат [2].

Масштабы образования и распространения пыли при разработке месторождений полезных ископаемых, закономерности распространения различных фракций пыли различной крупности на железорудных предприятиях детально изучены академиком В.В. Адушкиным. В работах академика К.Н. Трубецкого, Ю.П. Галченко, Н.Н. Чаплыгина, В.И. Папичева [3; 4], проведенных в ИПКОН РАН, рассмотрены экологические проблемы геотехнологий, вопросы устойчивости экосистем и экологической безопасности природно-технических систем освоения недр, особенно их воздействия на природные ресурсы при разработке месторождений, примеры и методика расчета интегральных нагрузок на компоненты природной среды, особенности применения ресурсного подхода для экологических оценок.

В работах В.С. Федотенко, И.Б. Катанова, А.А. Силкина [5–10] всесторонне изучены особенности применения гидрогелевой забойки при взрывных работах. Применение конструкций подвесной забойки и инновационных способов рассредоточения зарядов в скважине позволяет сократить удельный расход ВВ от 9,5% до 12,3% [1]. Максимальный эффект пылеподавления достигается при использовании комбинаций из трех способов пылеподавления: орошения поверхности уступа, внутренней и внешней гидрозабойки. Механизм коагуляции мелкодисперсной пыли при смачивании водой и растворами ПАВ рассмотрен в работах П.В. Берсевича, В.А. Михайлова и С.С. Филатова [11].

**Результаты исследования**

В ИПКОН РАН [12–14] разработан ресурсный подход для оценки воздействия взрывных работ и в целом горного производства на окружающую среду, методология расчета интегральной нагрузки в результате техногенного воздействия на основные компоненты природной среды, учитывающие непосредственное и опосредованное потребление природных ресурсов. Приведены результаты расчета изменения нагрузки на атмосферу при различном объеме взорванной горной массы с удалением от эпицентра взрыва в период прохождения пылегазового облака. На основе анализа данных, приведенных в работах [10–14], получены графические зависимости изменения величины обобщающего показателя нагрузки на окружающую среду в относительных единицах от массы одновременно взрываемого ВВ и расстояния от эпицентра взрыва (рис. 1 и 2).



**Рис. 1**  
Изменение нагрузки на атмосферу при увеличении расстояния от эпицентра взрыва

**Fig. 1**  
Changes in the load on the atmosphere with increasing distance from the blast epicenter

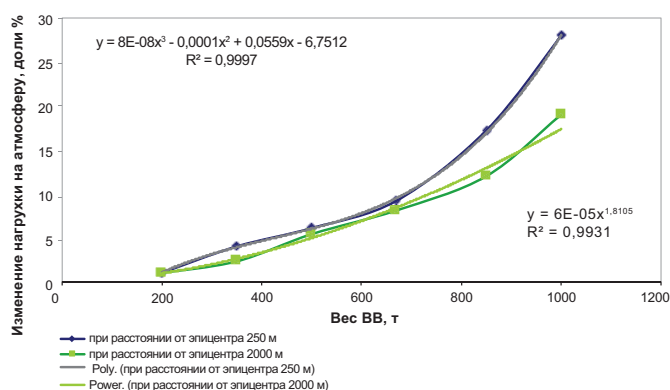
Как видно из рис. 1, зависимость нагрузки на атмосферу от расстояния от эпицентра взрыва – нелинейно убывающая и может быть описана с коэффициентом корреляции 0,998 следующей функцией:

$$y = 2 - 9x^3 + 3 - 5x^2 - 0,0962x + 124,69.$$

При этом наибольший индекс снижения нагрузки – при увеличении расстояния от эпицентра взрыва с 250 до 1500 м, и составляет в среднем 61,52 (%/км). На расстоянии от 1500 до 3500 м средний индекс снижения нагрузки на атмосферу составил 12,44 (%/км). Численные значения индекса изменения нагрузки на атмосферу предлагается определять как отношение снижения нагрузки на атмосферу к изменению расстояния до эпицентра взрыва.

Важным фактором выбора технологических вариантов и масштабов ведения добычных работ является оценка критических нагрузок экосистем, их емкости, как важнейшего компонента устойчивого развития [15]. В этой связи представляется целесообразным проводить детальную оценку экологических последствий взрывных работ во времени с учетом массы ВВ, химического состава пылегазового облака, которые зависят от вещественного состава взрывааемых горных пород, используемых ПВВ и полноты их химического превращения.

На рис. 2 показан характер изменения нагрузки на атмосферу на расстоянии 250 и 2000 м при увеличении массы взрываемого ПВВ на открытых горных работах. Нагрузка на атмосферу с увеличением массы взрываемого ПВВ нелинейно возрастает и может быть описана полиномиальной или степенной функцией в диапазоне расстояний от эпицентра взрыва от 250 до 2000 м.



**Рис. 2**  
Изменение нагрузки на атмосферу при увеличении массы одновременно взрываемого ВВ на открытых горных работах на различном расстоянии от эпицентра взрыва

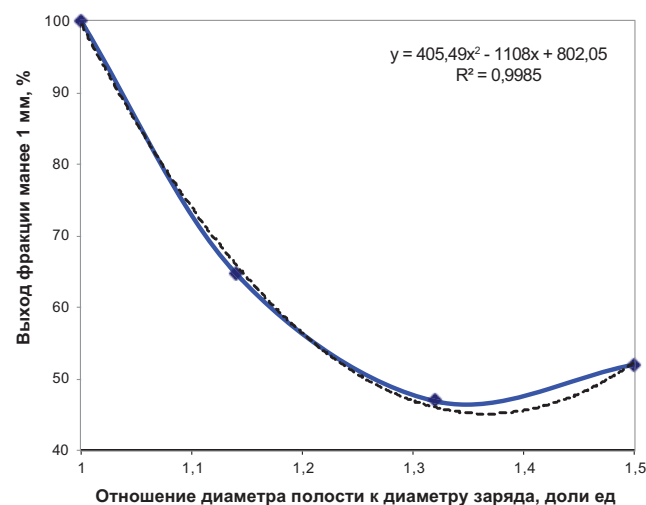
**Fig. 2**  
Changes in the load on the atmosphere with increasing weight of simultaneously detonated explosives in surface mining operations at various distances from the blast epicenter

В работах доктора технических наук, проф. В.А. Белина показана специфика оценки техногенных последствий применения энергоемких конверсионных ПВВ для разрушения горных пород при открытой разработке месторождений, необходимость учета химического состава продуктов детонации и их взаимодействия с взрывааемыми и складированными в отвалы породами [16–19].

В ИПКОН РАН разработаны составы ПВВ и проведены исследования эффективности применения отходов переработки резинотехнических изделий для производства простейших взрывчатых веществ на местах применения [20–22]. С применением метода сглаженных частиц

(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) проведены расчеты и установлено, что замена индивидуальных высокобризантных ВВ (содержащих тротил или гексоген) на смеси с аммиачной селитрой в равных пропорциях позволяет снизить выход мелких фракций в зависимости от прочности пород в 1,5–2,8 раза.

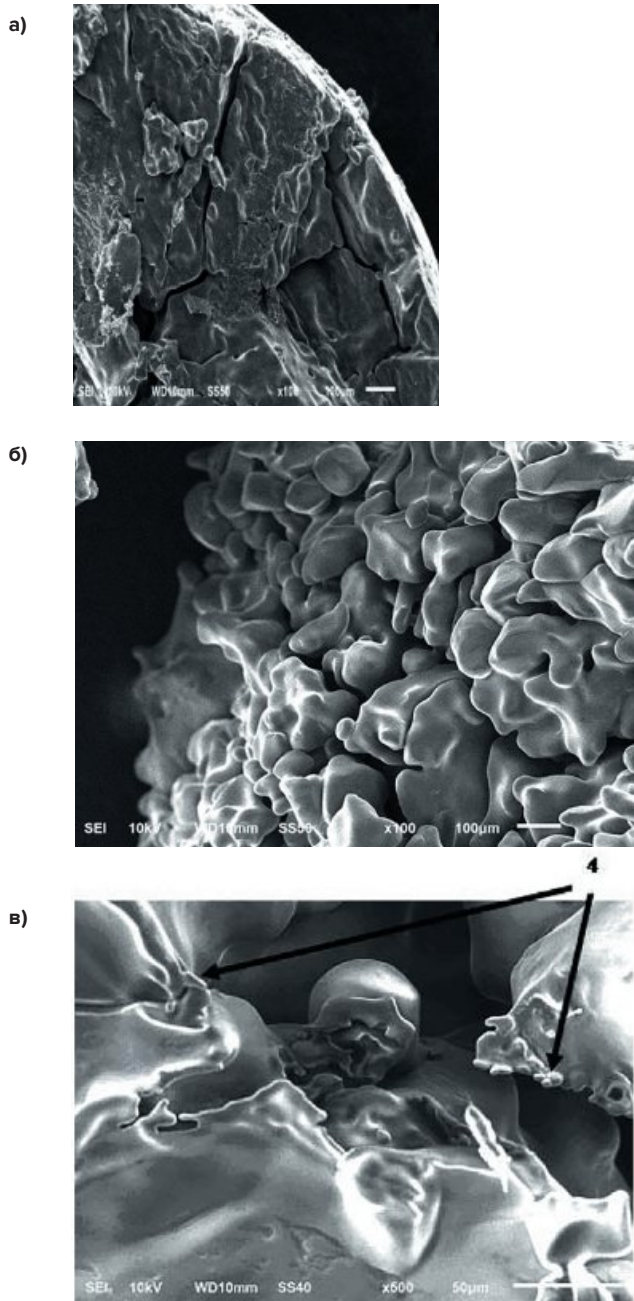
С использованием метода сглаженных частиц и осесимметричной модели воздействия взрыва зарядов с воздушными промежутками изучено влияние на выход мелочи (фракций менее 1 мм) размера зазора между зарядами ПВВ и зарядной полостью. На рис. 3 представлена зависимость изменения выхода мелких фракций в относительных единицах от параметра, характеризующего соотношение диаметра заряда и зарядной камеры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование конструкций зарядов, обеспечивающих зазор между ПВВ и стенкой скважины или шпура, позволит в два раза сократить выход мелких фракций и соответственно их содержание в пылегазовом облаке и обеспечит возможность снижения нагрузки на атмосферу, безопасное для окружающей среды увеличение объемов одновременно взрывааемой горной массы. Методические аспекты исследования при проведении полигонных и промышленных испытаний, компьютерном моделировании влияния кинетики выделения энергии, плотности ПВВ, диаметра заряда на локализацию деформаций и напряжений в разрушаемых средах, фрагментацию горных пород, выход мелких фракций рассмотрены в работах [23–27]. Характер влияния других факторов на выход мелких фракций будет рассмотрен в следующих исследованиях.



**Рис. 3**  
Влияние величины зазора между зарядом и зарядной полостью на выход фракций менее 1 мм

**Fig. 3**  
Dependence of the size of the gap between the charge and the charging chamber on the yield of fractions below 1 mm

В ИПКОН РАН проведены работы по научному обоснованию энергосберегающей технологии производства и применения гранулированных ПВВ, в составе которых вместо дизельного топлива и масла используются специальные топливные смеси. Одним из путей безопасного увеличения объемов одновременно взрывааемой горной массы является внедрение энергосберегающих экологически безопасных технологий производства и применения ПВВ, обеспечивающих повышение полноты химических преобразований и КПД взрыва за счет применения в составах



**Рис. 4**  
Структура внутренней поверхности гранул гладкой аммиачной селитры до (а) и после (б) пропитки поризующей эмульсией; (в) – новые микрокристаллические структуры – центры концентрации напряжений и передачи детонации. Получены в ИПКОН РАН с использованием электронного микроскопа JSM-6610LV (JEOL)

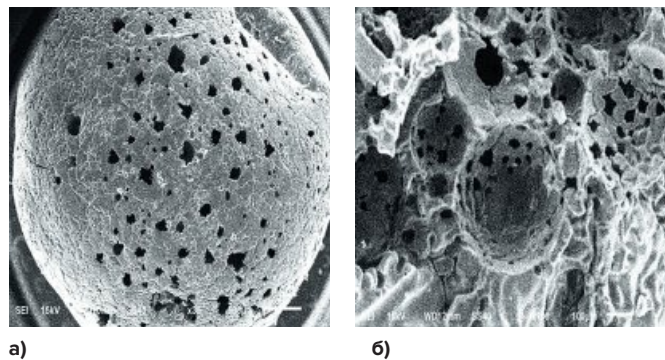
**Fig. 4**  
Inner surface structure of the smooth ammonium nitrate granules before (a) and after (b) impregnation with a pore-producing emulsion; (v) – new microcrystalline structures being the centers of stress concentration and detonation transfer. Obtained at IPKON RAS using the JEOL JSM-6610LV Scanning Electron Microscope

гранулированных промышленных взрывчатых веществ вместо дизельного топлива специальных топливных смесей, содержащих поверхностно-активные вещества, увеличивающие на несколько порядков площадь контакта топлива и окислителя, плотность ВВ, изготовленного с использованием пористой селитры с 0,85 до 1,15 т/м<sup>3</sup>, стабильность, энергоемкость зарядов ВВ при нулевом кислородном балансе и существенно меньшем критическом диаметре детонации. Исследования морфологии аммиач-

ной селитры и многокомпонентных топливных смесей показало, что снижение критического диаметра детонации достигается за счет многократного увеличения площади контакта топлива и окислителя в результате применения поризующих эмульсий и формирования дополнительной системы центров передачи детонации за счет модификации структуры гладкой и пористой аммиачной селитры (рис. 4, 5).

Применение поризующих эмульсий позволяет сформировать в процессе заряжания скважин дополнительную систему трещин и каналов как в гладкой аммиачной селитре, так и в пористой аммиачной селитре (рис. 5), которые позволяют заполнить высокоэнергетическими компонентами топливной смеси внутреннее пространство пор и увеличить плотность ВВ и соответственно его дробящую способность.

Проведен комплекс лабораторных и полигонных испытаний составов дробящего и щадящего действия с применением методов подводного взрыва и электромагнитного метода, промышленных испытаний с замером скорости детонации и кусковатости взорванной горной массы. Скорость детонации в пластиковой трубе зарядов диаметром 65 мм составила 3,6 км/с, а в скважинах 105 и 160 мм – 4,1 км/с. Анализ результатов испытаний электромагнитным методом на полигоне ИПХФ РАН (г. Черноголовка) показал, что разработанные составы гранулитов на основе топливных смесей, содержащих ПАВ и комплекс энергетических и модифицирующих добавок обеспечивают (по сравнению с составами АС/ДТ-6 на дизельном топливе) существенный прирост массовой скорости (на 21%) и давления продуктов детонации, плотности и скорости выделения энергии (на 33–45%), и продолжительности импульса воздействия на разрушаемые среды.



**Рис. 5**  
Структура внешней (а) и внутренней (б) поверхности гранул пористой аммиачной селитры. Получены в ИПКОН РАН с использованием электронного микроскопа JSM-6610LV (JEOL)

**Fig. 5**  
Structure of the outer (a) and inner (б) surface of porous ammonium nitrate granules. Obtained at IPKON RAS using the JEOL JSM-6610LV Scanning Electron Microscope

Результаты сравнительной оценки скорости выделения энергии зарядами различных гранулированных ПВВ представлены в табл. 1.

Применение топливных смесей, суспензий на основе поризующих эмульсий, вещественный состав которых формируется в зависимости от физико-механических свойств разрушаемых пород, для обеспечения дробящего и щадящего действия взрыва дает дополнительные возможности управления кинетикой выделения и передачи

**Таблица 1**  
Сравнительная оценка скорости выделения энергии зарядами гранулированных пластических взрывчатых веществ

**Table 1**  
Comparative assessment of the energy release rates by charges of granular plastic explosives

Наименование ПВВ	Диаметр скважинного заряда, мм	Скорость выделения энергии, ккал/с
Гранулит «ЕФ-П»	115 160	38,96 10 <sup>6</sup> 82,43 10 <sup>6</sup>
Гранулит М	115 160	23,82 10 <sup>6</sup> ...28,5 10 <sup>6</sup> 61,71 10 <sup>6</sup>
Гранулит Игданит на плотной гладкой селитре	115 160	Детонация затухает 45,59 10 <sup>6</sup>
Граммонит 79/21	115 160	31,36 10 <sup>6</sup> 71,40 10 <sup>6</sup>

энергии взрыва, перераспределения во времени и пространстве локализации напряжений в разрушаемой среде и достижения необходимой степени фрагментации массива горных пород.

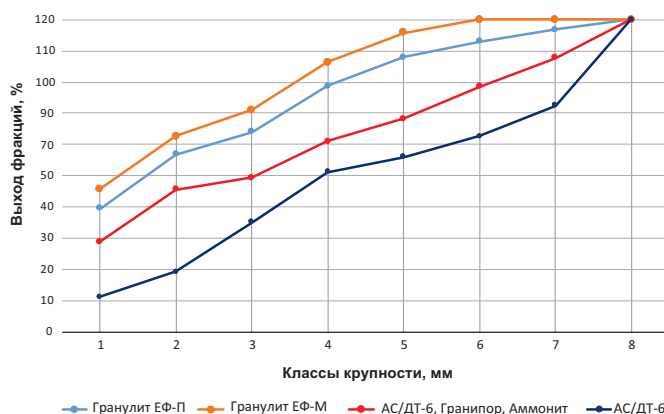
Как показали многолетние промышленные испытания Гранулита «ЕФ-П», применение поризующих топливных смесей практически исключает образование окислов азота и снижает средний кусок взорванной горной массы и выход негабарита, область распространения продуктов детонации и разлет фрагментов разрушенной взрывом горной массы при увеличении зоны контролируемого дробления на 25–30%, что создает предпосылки для снижения расхода бурения и затрат на буровзрывные работы. На рис. 5 приведены фотографии пылегазового облака после взрыва скважинных зарядов Гранулита «ЕФ-П», полученные в процессе промышленных испытаний инновационного состава ВВ, изготовленного с применением технологии, предусматривающей комбинированные физико-химические воздействия (а), и взрыва зарядов в аналогичных условиях смеси АС/ДТ-6 на дизельном топливе и пористой селитре в комбинации с зарядами гранипора для увеличения интенсивности дробления известняков повышенной прочности. На рис. 7 представлены интегральные графики гранулометрического состава взорванной горной массы, полученные с применением Гранулита «ЕФ-П» (оранжевый и голубой цвет интегрального графика), АС/ДТ-6 и в смеси с гранипором и аммонитом 6-ЖВ (красная линия), АС/ДТ-6 (синяя линия). Следует отметить, применение инновационного ПВВ при существенно меньших экологических последствиях обеспечило увеличение интенсивности дробления массива при равном удельном расходе ВВ.

Снижение энергоёмкости добычи и техногенного воздействия взрывных работ на окружающую среду, расхода ВВ сейсмического действия взрыва, переизмельчения товарной продукции, радиуса опасной зоны может быть так же достигнуто за счет применения размещенных в рукавах зарядов с переменным диаметром. Такие конструкции детонационных систем обеспечат зазор между зарядной камерой и зарядом, изолированным от попадания воды, и позволят снизить долю энергии взрыва, расходуемую на переизмельчение, в ближней зоне действия взрыва.



**Рис. 6**  
Продукты детонации гранулита, изготовленного с применением поризующей эмульсии и топливной смеси на обводненном участке (а); пылегазовое облако при взрыве смеси АС/ДТ-6 на дизельном топливе и пористой селитре и гранипора (б)

**Fig. 6**  
Blast products of granulate made with a pore-producing emulsion of the fuel mixture in the wet zone (a); dust and gas cloud from the blast with the АС/DT-6 mixture with diesel fuel, porous ammonium nitrate and the Granipor explosive (b)



**Рис. 7**  
Интегральные графики гранулометрического состава взорванной горной массы, полученных с применением Гранулита «ЕФ-П» (оранжевый и голубой цвет интегрального графика), АС/ДТ-6 и в смеси с гранипором и аммонитом 6-ЖВ (красная линия), АС/ДТ-6 (синяя линия)

**Fig. 7**  
Cumulative line graphs of the grain size distribution of the muck pile obtained using Granulite EF-P (orange and blue lines), АС/DT-6 and in a mixture with the Granipor explosive and Ammonite 6-ZhV (red line), АС/DT-6 (blue line)

## Выводы

Актуальность проводимых исследований неуклонно возрастает в связи с ростом единичной мощности выемочного оборудования, масштабов и интенсивности горных работ открытым способом, увеличением объемов добычи полезных ископаемых на большой глубине и вблизи населенных пунктов. Представляется, что повышение полноты химических превращений промышленных взрывчатых веществ является одним из действенных способов увеличения допустимых объемов одновременно взрывающейся горной массы с учетом экологической безопасности ведения горных работ при открытой разработке полезных ископаемых.

Методология формирования рациональной стратегии снижения техногенной нагрузки на окружающую среду при разработке полезных ископаемых требует системного подхода на основе классификаций методов управления экологической нагрузкой и связана прежде всего с вопросами совершенствования и разработкой новых составов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), технологий их применения, оптимизацией параметров кинетики инициирования зарядов, совершенствованием конструкций забойки и других элементов детонационных систем, масштабов и режима взрывных работ.

Инновационные решения в области совершенствования средств разрушения горных пород, конструкции и вещественного состава зарядов ПВВ, направленные на повышение полноты химических превращений, расширение возможностей управления действием энергии взрыва, применение специальных конструкций и материалов для забойки и инициирования зарядов, должны стать элементами классификации методов управления техногенным воздействием на окружающую среду.

Изучены закономерности влияния масштабов взрывных работ, расстояния от эпицентра взрыва на относительное изменение нагрузки на окружающую среду. Полученные зависимости могут быть использованы для формирования

цифровой многофакторной модели управления техногенным воздействием взрывных работ на окружающую среду.

Проведенные исследования показали, что одним из способов безопасного увеличения объемов единовременного взрывания (для окружающей среды и объектов жилого и промышленного назначения) является применение инновационных составов взрывчатых веществ на основе порирующих эмульсий топливных смесей, а также специальных конструкций зарядов.

С использованием метода сглаженных частиц и осесимметричной модели воздействия взрыва зарядов с воздушными промежутками установлена степень влияния диаметра скважин и величины зазора между зарядом и зарядной полостью на выход фракций менее 1 мм, а также изменения выхода мелочи при замене взрывчатых материалов с высокой скоростью детонации на смесевые составы, содержащие модифицированную аммиачную селитру и многокомпонентные топливные смеси, обеспечивающие увеличение продолжительности импульса напруги в разрушаемой среде. Использование зарядов, обеспечивающих зазор между ВВ и стенкой скважины, позволит перераспределить кинетику выделения энергии во времени и пространстве взрывающегося массива, сократить выход мелких фракций в товарной продукции и пылегазовом облаке.

В дальнейшей работе предполагается проведение исследований эффективности инновационных решений в области буровзрывных работ при проведении массовых взрывов в условиях горного производства на предприятиях АО «УК «Кузбассразрезуголь» с инструментальными замерами скорости детонации взрывчатых веществ в скважинах, сейсмических колебаний, ударной воздушной волны, фракционного состава взорванной горной массы, изменения во времени и пространстве вещественного состава пылегазового облака и их компьютерное моделирование, а также отработка элементов системы удаленного мониторинга буровзрывных работ.

## Список литературы

1. Матва С.В., Кокин С.В., Литвин Ю.И., Протасов С.И., Корнев Г.Н., Федотенко В.С. Совершенствование способов буровзрывной подготовки пород на предприятиях ОАО «УК «Кузбассразрезуголь». *Уголь*. 2015;(12):24–32. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2015-12-24-31>
2. Голубин К.А. *Обоснование резерва взорванной горной массы на разрезах с автомобильным транспортом: автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Кемерово; 2013. Режим доступа: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01006764523.pdf?ysclid=lai9sayij362946920](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01006764523.pdf?ysclid=lai9sayij362946920)
3. Чаплыгин Н.Н., Галченко Ю.П., Папичев В.И., Жулковский Д.В., Сабянин Г.В., Прошляков А.Н. *Экологические проблемы геотехнологий: новые идеи, методы и решения*. М.: Научтехлитиздат; 2009. 320 с.
4. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. *Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества*. М.: Научтехлитиздат; 2003. 261 с.
5. Катанов И.Б., Федотенко В.С. *Низкоплотные материалы в конструкции скважинных зарядов на карьерах*. Кемерово: Кузбассвузиздат; 2012. 124 с.
6. Михайлов В.А., Лобода А.И., Бересневич П.В., Борисов В.Г. *Борьба с пылью в рудных карьерах*. М.: Недра; 1981. 262 с.
7. Гурин А.А., Яценко С.С. Применение гидрогелевой забойки взрывных скважин. *Безопасность труда в промышленности*. 1986;(7):38–40. Режим доступа: <https://www.btpnadzor.ru/archive/primenenie-gidrogelevoiy-zaboyki-vzryvnykh-skvazhin>
8. Силкин А.А., Шеметов П.А., Бибики И.П., Катанов И.Б. Использование многокомпонентных смесей для забойки скважин. *Горный вестник Узбекистана*. 2005;(1):23–25.
9. Федотенко С.М., Федотенко В.С., Федотенко Н.А. *Подвесная скважинная забойка*. Патент 2401416. Российская Федерация; заявл.22.07.09; опубл.20.01.2010, Бюл. № 28. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2401416C1/ru>
10. Федотенко С.М., Федотенко В.С., Федотенко Н.А. *Способ рассредоточения заряда в скважине*. Патент 2379621. Российская Федерация; заявл. 28.07.08; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 25.: ил. 2. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2379621C1/>
11. Бересневич П.В., Михайлов В.А., Филатов С.С. *Аэрология карьеров: Справочник*. М.: Недра; 1990. 280 с.
12. Чаплыгин Н.Н., Папичев В.И., Бризнюк Г.И., Прошляков А.Н., Столяров Д.О. Новые методы оценки воздействия горного производства на окружающую среду. В кн.: Красноштейн А.Е., Новожилов Ю.Л. (ред.) *Горные науки на рубеже XXI века: материалы Междунар. конф.* Екатеринбург: Горный ин-т; 1998. С. 468–477.

13. Папичев В.И. *Методология комплексной оценки техногенного воздействия горного производства на окружающую среду: автореф. дис. ... д-ра техн. наук.* М.; 2004. 41 с.
14. Папичев В.И., Прошныяков А.Н. Об оценке техногенной нагрузки горного производства на породный массив в результате производства взрывных работ в карьере. *Экологические системы и приборы.* 2002;(9):24–28.
15. Калабин Г.В. *Экодинамика техногенных провинций Севера.* Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2000. 292 с.
16. Белин В.А. Экологические особенности взрыва зарядов ВВ с конверсионными компонентами. В кн.: Трубецкой К.Н., Викторов С.Д. (ред.) *Физические проблемы взрывного разрушения массива горных пород: материалы Междунар. конф., Москва, 7–11 сент. 1998 г.* М.: ИПКОН РАН; 1999. С. 97–100.
17. Анисимов В.Н., Франтов А.Е. Пылегазоподавление при крупномасштабных взрывах при применении конверсионных ВМ. В кн.: *Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов: сб. докл. 7-й Междунар. науч.-техн. конф.* М.: Оружие и технологии; 2007. С. 246–250.
18. Папичев В.И., Франтов А.Е. К вопросу оценки экологического воздействия на природную среду при применении конверсионных взрывчатых веществ. *Взрывное дело.* 2010;(103/60):283–293.
19. Папичев В.И., Франтов А.Е. Сравнительная оценка экологических воздействий на атмосферу при использовании конверсионных взрывчатых материалов. *Экологические системы и приборы.* 2008;(2):55–58.
20. Захаров В.Н., Викторов С.Д., Ефремовцев Н.Н., Вартапов А.З., Закалкин В.М. О применении материалов утилизации резинотехнических изделий в производстве простейших взрывчатых веществ. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2018;(S1):192–196. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-1-192-196>
21. Викторов С.Д., Захаров В.Н., Вартапов А.З., Закалкин В.М., Ефремовцев Н.Н., Франтов А.Е. и др. *Состав взрывчатой смеси.* Патент 2666426. Российская Федерация; заявл. 17.03.17; опубл. 07.09.2018, Бюл. №25. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2666426C1/ru>
22. Викторов С.Д., Захаров В.Н., Франтов А.Е., Поставнин Б.Н., Жариков И.Ф., Мингазов Р.Я. и др. *Состав простейшего взрывчатого вещества и способ его реализующий.* Патент 2663037. Российская Федерация; заявл. 23.12.16; опубл. 01.08.2018, Бюл. №22. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2663037C2/ru>
23. Ефремовцев Н.Н., Ефремовцев П.Н. Результаты исследования в производственных условиях влияния кинетики выделения энергии взрыва на дробимость горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2015;(S8):17–25.
24. Ефремовцев Н.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2020;(8):73–85. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85>
25. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Исследование закономерностей дробления удлиненными зарядами с применением композиционных моделей и численного моделирования методом сглаженных частиц. *Взрывное дело.* 2020;(128-85):20–37.
26. Ефремовцев Н.Н., Ефремовцев П.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Результаты численных исследований фрагментации горных пород в пределах взрываемого блока с применением бессеточного метода сглаженных частиц. *Взрывное дело.* 2021;(130-87):29–45.
27. Викторов С.Д., Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е., Долгова М.О. Теоретические аспекты и результаты численных исследований методом сглаженных частиц влияния плотности зарядов на фрагментацию горных пород. *Взрывное дело.* 2022;(135-92):15–31.

## References

1. Matva S.V., Kokin S.V., Litvin Yu.I., Protasov S.I., Kornev G.N., Fedotenko V.S. Improvement of blast-hole drilling methods for rock mass preparation at the enterprises of “UK Kuzbassrazrezugol” OJSC. *Ugol*, 2015;(12):24–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2015-12-24-31>
2. Golubin K.A. *Justification of the muck pile reserve at strip mines with automobile haulage: Cand. Sci. (Eng.) diss.* Kemerovo; 2013. (In Russ.) Available at: [https://new-diss.ru/\\_avtoreferats/01006764523.pdf?ysclid=lai9sayij362946920](https://new-diss.ru/_avtoreferats/01006764523.pdf?ysclid=lai9sayij362946920)
3. Chaplygin N.N., Galchenko Yu.P., Papichev V.I., Zhulkovsky D.V., Sabyanin G.V., Proshlyakov A.N. *Environmental challenges of geotechnologies: new insights, methods and solutions.* Moscow: Nauchtekhlitizdat; 2009. 320 p. (In Russ.)
4. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P., Burtsev L.I. *Environmental challenges of mining in conditions of sustainable development of the nature and society.* Moscow: Nauchtekhlitizdat; 2003. 261 p. (In Russ.)
5. Katanov I.B., Fedotenko V.S. *Low-density materials in design of blast hole charges in surface mines.* Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2012. 124 p. (In Russ.)
6. Mikhailov V.A., Loboda A.I., Beresnevich P.V., Borisov V.G. *Dust control in surface ore mines.* Moscow: Nedra; 1981. 262 p. (In Russ.)
7. Gurin A.A., Yashchenko S.S. Application of blasthole plugging with hydrogel. *Occupational Safety in Industry.* 1986;(7):38–40. (In Russ.) Available at: <https://www.btpnadzor.ru/archive/primenenie-gidrogelevoiy-zaboyki-vzryvnykh-skvazhin>
8. Silkin A.A., Shemetov P.A., Bibik I.P., Katanov I.B. Use of multicomponent mixtures for borehole plugging. *Gorniy Vestnik Uzbekistana.* 2005;(1):23–25. (In Russ.)
9. Fedotenko S.M., Fedotenko V.S., Fedotenko N.A. *Suspended borehole tamping.* Invention 2401416. Russian Federation; 20.01.2010. (In Russ.) Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2401416C1/en>
10. Fedotenko S.M., Fedotenko V.S., Fedotenko N.A. *Method for charge dispersal in hole.* Invention 2379621. Russian Federation; 20.01.2010. (In Russ.) Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2379621C1/en>
11. Bersenevich P.V., Mikhailov V.A., Filatov S.S. *Aerology of surface mines: a reference book.* Moscow: Nedra; 1990. 280 p. (In Russ.)
12. Chaplygin N.N., Papichev V.I., Briznyuk G.I., Proshnyakov A.N., Stolyarov D.O. New methods to assess the impact of mining operations on the environment. In: Krasnoshtein A.E., Novozhilov Yu.L. (eds) *Mining Sciences at the Turn of the XXI Century: Proceedings of the International Conference,* Ekaterinburg: Mining Institute; 1998, pp. 468–477. (In Russ.)
13. Papichev V.I. *Methodology of integrated assessment of man-made impact of mining operations on the environment: Dr. Sci. (Eng.) diss.* Moscow; 2004. 41 p. (In Russ.)
14. Papichev V.I., Proshnyakov A.N. On assessment of the man-made load of mining operations on the rock mass as the result of blasting activities in the open pit. *Ecological Systems and Devices.* 2002;(9):24–28. (In Russ.)

15. Kalabin G.V. *Ecodynamic of anthropogenic environment province of the North*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2000. 292 p. (In Russ.)
16. Belin V.A. Environmental features of blasting explosive charges with conversion components. In: Trubetskoy K.N., Viktorov S.D. (eds) *Physical challenges of rock mass blasting: Proceedings of the International Conference, Moscow, September 7–11 1998*. Moscow: Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences; 1999, pp. 97–100. (In Russ.)
17. Anisimov V.N., Frantov A.E. Dust control in large-scale blasting using conversion explosive materials. In: *Integrated Utilization of Conventional Ammunition: Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference*, Moscow: Oruzhie i tekhnologii; 2007, pp. 246–250. (In Russ.)
18. Papichev V.I., Frantov A.E. Estimation of ecological affecting natural environment at application of demilitarization explosive materials. *Explosion Technology*. 2010;(103/60):283–293. (In Russ.)
19. Papichev V.I., Frantov A.E. Conversion explosive materials utilization: comparative evaluation of ecological influence upon the atmosphere. *Ecological Systems and Devices*. 2008;(2):55–58. (In Russ.)
20. Zakharov V.N., Viktorov S.D., Efremovtsev N.N., Vartanov A.Z., Zakalinskiy V.M. On the use of materials recycling of rubber products in the manufacture of simple explosives. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S1):192–196. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-1-192-196>
21. Viktorov S.D., Zakharov V.N., Vartanov A.Z., Zakalinskiy V.M., Efremovtsev N.N., Frantov A.E. et al. Composition of explosive mixture. Invention 2666426. Russian Federation. 07.09.2018. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2666426C1/en>
22. Viktorov S.D., Zakharov V.N., Frantov A.E., Postavnin B.N., Zharikov I.F., Mingazov R.Ya. Composition of the simplest explosive and the method of its implementation. Invention 2663037. Russian Federation. 01.08.2018. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2663037C2/en>
23. Efremovtsev N. N., Efremovtsev P. N. The results of the study in production conditions of the influence of the kinetics of the release of explosive energy on the crushability of rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S58):17–25. (In Russ.)
24. Efremovtsev N.N., Trofimov V.A., Shipovskii I.E. Strain concentration in wave field generated by blasting in elongated boreholes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(8):73–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85>
25. Efremovtsev N.N., Shipovskii I.E. Investigation of the dynamic working of long charges by composition models coupling with computer simulation by the smoothed. *Explosion Technology*. 2020;(128-85):20–37. (In Russ.)
26. Efremovtsev N.N., Efremovtsev P.N., Trofimov V.A., Shipovskii I.E. Investigation of the dynamic working of long charges by composition models coupling with computer simulation by the smoothed particle hydrodynamics method. *Explosion Technology*. 2021;(130-87):29–45. (In Russ.)
27. Viktorov S.D., Efremovtsev N.N., Shipovskii I.E., Dolgova M.O. Theoretical aspects and results of numerical investigations by the smoothed particle hydrodynamics method of the effect of charge density on rock fragmentation. *Explosion Technology*. 2022;(135-92):15–31. (In Russ.)

**Информация об авторах**

**Захаров Валерий Николаевич** – доктор технических наук, академик РАН, профессор, директор, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [ipkon-dir@ipkonran.ru](mailto:ipkon-dir@ipkonran.ru)

**Ефремовцев Никита Николаевич** – кандидат технических наук, действительный член Академии горных наук, старший научный сотрудник отдела №5 геомеханики и разрушения горных пород, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [noee7@mail.ru](mailto:noee7@mail.ru)

**Федотенко Виктор Сергеевич** – доктор технических наук, ученый секретарь института, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [victorfedotenko@gmail.com](mailto:victorfedotenko@gmail.com)

**Information about the authors**

**Valery N. Zakharov** – Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation; e-mail: [ipkon-dir@ipkonran.ru](mailto:ipkon-dir@ipkonran.ru)

**Nikita N. Efremovtsev** – Cand. Sci. (Eng.), A Full-Fledged Member of the Academy of Mining Sciences, Senior Research Associate at Department No. 5 of Geomechanics and Rock Disintegration, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation; e-mail: [noee7@mail.ru](mailto:noee7@mail.ru)

**Victor S. Fedotenko** – Dr. Sci. (Eng.), Academic Secretary, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation; e-mail: [victorfedotenko@gmail.com](mailto:victorfedotenko@gmail.com)

**Article info**

Received: 25.10.2022

Revised: 14.11.2022

Accepted: 15.11.2022

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 25.10.2022

Поступила после рецензирования: 14.11.2022

Принята к публикации: 15.11.2022