

# Методические вопросы комплексной оценки дробящего и техногенного действия взрывных работ при открытой разработке месторождений

В.С. Федотенко, Н.Н. Ефремовцев✉, А.В. Харченко

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,  
г. Москва, Российская Федерация

✉ noee7@mail.ru

**Резюме:** Современные условия разработки месторождений полезных ископаемых характеризуются повышением требований к экологическим последствиям производства, а также увеличением объемов работ вблизи населенных пунктов, ростом единичной мощности горнотранспортного оборудования и объемов одновременно взрывающейся горной массы. В этой связи возрастает важность проведения исследований в области разработки энергоэффективных технологий процессов дробления горных пород и поиском безопасных способов их интенсификации при минимальных вредных последствиях массовых взрывов. В статье изложены методические особенности комплексной оценки дробящего и техногенного действия взрыва в условиях полигона и на борту карьера, методические аспекты расчета энергии, расходуемой на сейсмическое действие взрыва и ударную воздушную волну. Приведены результаты систематизации способов управления сейсмическим действием взрыва. Рассмотрены результаты сравнительной оценки плотности пылегазового облака и изменения во времени его высоты при применении различных гранулированных промышленных взрывчатых веществ. Показан методологический подход к комплексной оценке дробящего и техногенного действия промышленных взрывов на открытых горных работах.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, открытые горные работы, техногенное воздействие взрывного разрушения, сейсмическое действие взрыва, гранулометрический состав горной массы, пылегазовое облако, окислы азота

**Благодарности:** Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 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:** Федотенко В.С., Ефремовцев Н.Н., Харченко А.В. Методические вопросы комплексной оценки дробящего и техногенного действия взрывных работ при открытой разработке месторождений. *Горная промышленность*. 2024;(6):60–67. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-60-67>

# Methodological issues of a comprehensive assessment of the crushing and man-induced effects of blasting operations in open-pit mining

V.S. Fedotenko, N.N. Efremovtsev✉, A.V. Kharchenko

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

✉ noee7@mail.ru

**Abstract:** Current conditions of mining mineral deposits are characterized with raising requirements towards the environmental consequences of production, as well as increasing volumes of works near settlements, increasing unit capacity of the mining equipment and the volumes of simultaneously blasted rock mass. In this connection the importance of research into the development of energy-efficient technologies of the rock crushing processes and the search for safe methods of their intensification with the minimal harmful effects of large-scale blasting is increasing. The article presents specific methodical features of complex assessment of crushing and man-induced effects of blasting operations in conditions of a test ground and on those of an open pit wall, as well as methodical aspects of calculating the energy spent on seismic action of the blast and air shock wave. The results are provided of systematizing the methods to control the blast seismic action. The results of a comparative assessment of the dust and gas cloud density and its height change in time are discussed with reference to the application of different granulated commercial explosives. A methodological approach is shown to the integrated assessment of the crushing and man-induced effects of blasting operations in open-pit mining.

**Keywords:** drilling and blasting, open-pit mining, man-induced effects of blast crushing, seismic blast effects, particle size distribution of rock mass, dust and gas cloud, nitrogen oxides

**Acknowledgments:** The research was performed with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 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:** Fedotenko V.S., Efremovtsev N.N., Kharchenko A.V. Methodological issues of a comprehensive assessment of the crushing and man-induced effects of blasting operations in open-pit mining. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):60–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-60-67>

## Введение

Современные условия разработки месторождений полезных ископаемых характеризуются повышением требований к экологическим последствиям производства, а также увеличением объемов работ вблизи населенных пунктов, ростом единичной мощности горнотранспортного оборудования и объемов одновременно взрываваемой горной массы, сопровождающихся увеличением ореола распространения пыли и вредных газов [1; 2]. Увеличение веса одновременно взрываваемых промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) приводит к нелинейному росту нагрузки на атмосферу, что обуславливает важность создания инновационных экологически сбалансированных геотехнологий. Повышение производственной мощности разрезов требует использования экскаваторов с единичной мощностью более 30 мЗ и увеличения объемов одновременного взрывания скальной вскрыши [2]. Научный подход к решению сложных комплексных задач требует исследования закономерностей влияния различных факторов на рациональные параметры процессов горных работ и взвешенного учета экономической, энергетической и экологической составляющих. Важность проводимых исследований обусловлена также неполным химическим превращением и неустойчивой детонацией современных ПВВ при производстве взрывных работ в реальных, сложных условиях горного производства, трудоемкостью процесса формирования забойки при организации массовых взрывов. Одним из путей решения перечисленных выше проблем является разработка энергоэффективных «зеленых» технологий разрушения горных пород, поиск безопасных способов интенсификации процессов горных работ на крупных горнодобывающих предприятиях с открытым способом добычи с минимальными вредными последствиями проведения массовых взрывов.

## Методологические аспекты исследований

Объектом исследований является технологический комплекс буровзрывных работ, а предметом исследований – составы ПВВ, способы производства и применения ПВВ, параметры и конструкции зарядов, методы регулирования дробящих и вредных действий взрыва.

Для формирования рациональных вариантов разработки месторождений в современных условиях применим комплексный метод исследований, включающий:

- несколько стадий испытаний с мониторингом полезного и вредных действий взрыва на полигоне и в производственных условиях с оценкой влияния исследуемых вариантов на показатели работы выемочного оборудования;
- моделирование процессов горных работ и проверки

эффективности инновационных решений в опытно-промышленных условиях;

- мониторинг сейсмического действия взрыва и ударной воздушной волны, оценки кинетики параметров пылегазового облака и его вредных компонентов.

Научный подход к обоснованию рациональных параметров буровзрывных работ, выбору средств разрушения горных пород и конструкций применяемых детонационных систем, поиску рациональных решений с учетом техногенного и вредных действий взрыва, промышленных взрывчатых веществ, конструкций зарядов должен основываться на использовании классификаций – матриц возможных методов и способов управления полезным и вредными действиями взрыва.

В работе ИПКОН РАН [3] предложены варианты систематизации методов управления действием взрыва на открытой поверхности при добыче полезных ископаемых. Анализ работ, посвященных исследованию особенностей влияния различных факторов на дробящее и сейсмическое действие взрыва и параметры ударной воздушной волны [4–6], позволяет систематизировать способы управления сейсмическим действием взрыва с выделением следующих методов управления сейсмическим действием взрыва (МУСДВ):

- путем подбора средств инициирования зарядов, регулирования свойств и характеристик ПВВ (класс 1);
- путем регулирования удельного расхода ВВ (класс 2);
- путем регулирования массы зарядов и числа скважин (класс 3);
- путем регулирования параметров рассредоточения зарядов и полостей в взрываемом блоке массива горных пород (класс 4);
- путем регулирования параметров взрываемого блока, подпорной стенки (класс 5);
- путем подбора и изменения формы и конструкции заряда и зарядной камеры (класс 6);
- путем подбора схем и параметров замедления при инициировании зарядов с учетом направления трещиноватости массива на взрываемом блоке горных пород (класс 7).

Каждый класс методов управления действием взрыва включает несколько групп способов, которые будут рассмотрены подробно в следующих работах. В первую очередь представляют интерес технологические решения, обеспечивающие одновременно как повышение энергетической эффективности буровзрывных работ (БВР), дробящего действия взрыва, так и снижение его вредных воздействий. К числу таких решений следует отнести следующие доступные природоохранные технологии, разработанные с участием ИПКОН РАН:

1. Технология разрушения высоких уступов, в том числе с применением подпорной стенки [7]. Применение технологии взрывания высоких вскрышных уступов на подпорную стенку позволяет снизить сейсмический эффект и, как следствие, увеличить допустимую массу заряда ВВ.
2. Использование интеллектуальных геотехнологий и методов формирования скважинных зарядов с переменной кинетикой выделения энергии, роботизированных геотехнологий формирования детонационных систем для повышения безопасности и эффективности взрывных работ [8; 9].
3. Технология производства топливных смесей, содержащих множественные микро- и нанодисперсные поризующие эмульсии (ЭТС), заменяющие дизельное топливо в составе ПВВ с применением комбинированных физико-химических воздействий, а также производство и применение промышленных взрывчатых веществ и специальных конструкций зарядов [10], в которых вместо традиционных жидких компонентов ПВВ используется поризующие ЭТС, энергоемкие продукты переработки отходов промышленности, вещественный состав которых формируется в зависимости от физико-механических свойств и требований к гранулометрическому составу взрывааемых пород.

**Результаты и их обсуждение**

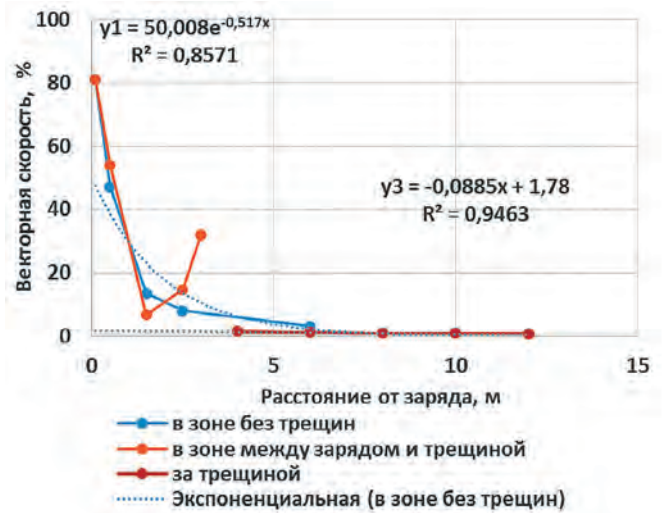
В ИПКОН РАН разработаны физико-технические основы и технологии разрушения высоких уступов крупномасштабными взрывами [11; 12]. Эффективным способом снижения показателя сейсмического действия взрыва при отработке уступов любой высоты является формирование подпорной стенки в виде слоя разрыхленной породы или экрана в виде щели [4; 5]. Технологические аспекты эффективного перехода на высокие вскрышные уступы для повышения полноты освоения месторождений и экологической безопасности горных работ на карьерах рассмотрены в работах [13]. Сейсмические и экологические факторы оптимизации управления кинетикой выделения энергии детонационными системами для обеспечения безопасного ведения взрывных работ рассмотрены в работе [14]. В частности, в результате обобщения проведенных экспериментальных работ в условиях полигона показано влияние скорости детонации на векторную скорость колебания грунта, а также наличие зоны оптимума при оценке уровня вредных газов.

В реальных условиях горного производства параметры распространения сейсмической энергии зависят от многих факторов. Регистрируемая величина параметров сейсмических колебаний зависит от комплекса горно-геологических и технологических условий, места регистрации сейсмических колебаний (СК), направления распространения от взрываемого блока в пределах карьера, направления детонации и системы естественной и наведенной трещиноватости. Величина амплитуды СК может отличаться в 1,2–2 раза в зависимости от направления распространения вдоль или перпендикулярно к борту карьера, существенно зависит от интервалов замедлений и массы взрываемого ВВ и числа взрывааемых блоков [4; 5; 15].

Как показала практика расчетов динамических задач геомеханики, используемый для исследований метод сглаженных частиц SPH может служить удобным инструментом для моделирования в целом всего процесса взрывных

работ, начиная от инициирования детонации зарядов, развития детонации, формирования волн нагружения и заканчивая разрушением горной породы и формированием фрагментированной отвальной массы массива. Метод SPH сочетает в себе преимущества как непрерывных, так и дискретных методов, и тем самым устраняет их недостатки [16–20].

На рис. 1 представлены полученные зависимости векторной скорости смещения горной породы от расстояния до заряда в различных зонах действия взрыва. Характер зависимостей существенно отличается. Между зарядом и трещиной, расположенной параллельно линии инициирования скважин, – нелинейная зависимость, имеющая два максимума, что связано с отражением части энергии от трещины и ее возврату. Поэтому сразу за трещиной идет скачкообразное снижение скорости смещения грунта и наблюдается ее линейное снижение с увеличением расстояния от заряда. Вблизи заряда в монолитном массиве зависимость векторной скорости от расстояния до заряда экспоненциальная.



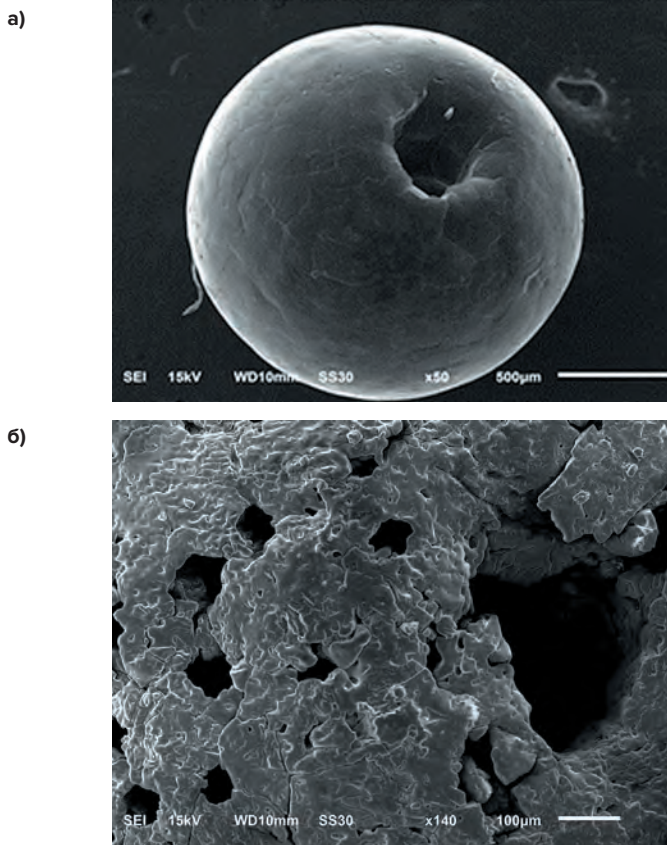
**Рис. 1** Зависимости векторной скорости смещения грунта от расстояния до заряда в различных зонах действия взрыва, полученные SPH методом

**Fig. 1** Dependences of the vector velocity of the rock mass displacement on the distance to the charge in different zones of the blast action, obtained by the SPH method

В ИПКОН РАН проведены исследования влияния комбинированных физико-химических методов на морфологию АС и дисперсный состав топливной смеси. Исследования, проведенные в ИПКОН РАН, показали, что средний размер капель и твердых энергетических добавок, в результате комбинированного физико-химического воздействия с использованием УЗ и ПАВ снижается соответственно до 5,6–5,8 мкм, а твердых энергетических добавок – до 6,4 и 6,5 мкм. При этом средний размер вновь созданных каналов в поверхности плотной аммиачной селитры (АС) и во внутренней структуре пористой АС достигает 50–60 мкм (рис. 2, б). Поэтому жидкая составляющая топливной смеси и твердые компоненты в виде мелкодисперсных сенсибилизирующих энергетических добавок проникают внутрь гранул (рис. 3).

Взрывчатые характеристики состава Гранулита ЕФ-П на основе микро- и нанодисперсной эмульсии топливной смеси, заменяющей дизельное топливо, рассмотрены в

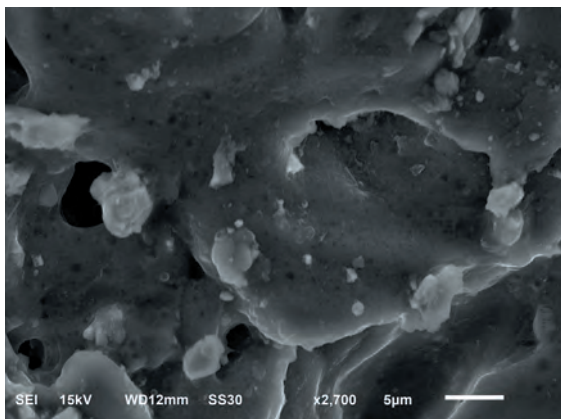




**Рис. 2**  
Внешняя поверхность гранулы аммиачной селитры производства Акрон: а – до обработки, б – после акустической обработки поризующей эмульсией топливной смеси

**Fig. 2**  
The outer surface of an ammonium nitrate granules produced by Acron: а – before the treatment, б – after acoustic treatment with the pore-inducing fuel mixture emulsion

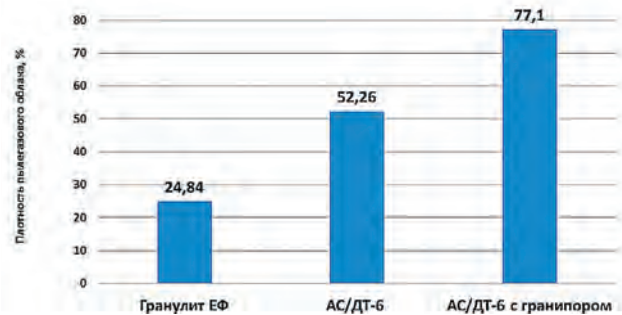
публикации [21]. На рис. 3 видно внутреннюю структуру гранул пористой аммиачной селитры «Акрон» после ее обработки эмульсией, содержащей водную фазу и порошкообразную энергетическую добавку, которая проникла во внутреннюю (первоначально закрытую) структуру гранулы АС.



**Рис. 3**  
Внутренняя структура гранул пористой аммиачной селитры «Акрон» после ее обработки эмульсией

**Fig. 3**  
The inner structure of Acron's porous ammonium nitrate granules after the emulsion treatment

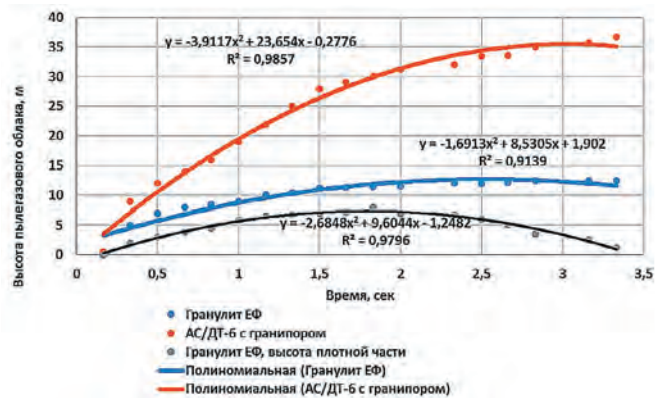
По результатам массовых взрывов в процессе промышленных испытаний инновационного состава ПВВ проведена сравнительная оценка содержания пыли и окислов азота. Для оценки содержания пыли в ПГО при применении различных промышленных ВВ использовался метод обработки изображений пылегазового облака, основанный на разделении видеоряда на отдельные изображения (с фиксацией времени с момента инициирования ВВ), переводе их в черно-белые и определении «плотности» серого цвета. В каждом элементарном участке изображения с использованием расчетов индекса RGB устанавливались градации серого цвета, численные значения которых рассчитаны в относительных единицах при значениях RGB для черного цвета, равном 100%. На рис. 4 приведены графические результаты расчетов численных значений градаций серого цвета, оценки средней плотности пылегазового облака и его изменения во времени при применении инновационного состава Гранулит ЕФ-П, гранулита, изготовленного с применением пористой селитры и 6%-ного дизельного топлива, и состава АС/ДТ-6 с добавлением гранипора.



**Рис. 4**  
Сравнительная оценка плотности пылегазового облака при взрывании в сопоставимых условиях гранулированных ПВВ

**Fig. 4**  
A comparative estimation of the dust and gas cloud density during blasting of granulated industrial explosives under comparable conditions

На рис. 5 приведены зависимости изменения во времени высоты пылегазового облака при применении различных составов гранулированных ПВВ.



**Рис. 5**  
Зависимости изменения во времени высоты пылегазового облака при применении различных составов гранулированных ПВВ

**Fig. 5**  
Dependences of change in the height of the dust cloud over time when different compositions of the granulated industrial explosives are used

В результате обработки видеоизображений распространения пылегазового облака установлен полиномиальный характер зависимостей изменения во времени высоты пылегазового облака и крупных фракций. При применении инновационного состава гранулита обеспечивается снижение высоты ПГО более чем 2 раза по сравнению с параметрами ПГО, образуемого от взрыва смесей гранулита с конверсионными компонентами.

Оценка содержания окислов азота осуществлена с использованием шкалы уровней выбросов NO<sub>2</sub> при взрывании на открытой поверхности, разработанной Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. Содержание окислов азота при взрыве Гранулита «ЕФ-П» на основе нано- и микро- дисперсной эмульсии топливной смеси, составов АС/ДТ-6 на пористой селитре и смеси АС/ДТ-6 с баллиститными порохами составило соответственно 2–4, 4–7 и более 17–70%. Комплекс технических решений по составу гранулированных ПВВ и технологии производства прошел многочисленные полигонные и промышленные испытания и включен РОСНАНО в Белую книгу «зеленых технологий».

Современные условия и требования к эксплуатации горнотехнических систем требуют системного анализа геоэкологических последствий массовых взрывов [1; 22]. Для комплексной оценки полезного дробящего и вредных действий взрыва, а также поиска вариантов энергоэффективных технологий ведения буровзрывных работ необходимо применение методологии системного анализа и численной оценки потенциальной химической энергии ВВ, химических потерь в результате неполного химического превращения, баланса полезных форм работы взрыва на деформирование и разрушение горных пород и вредных действий энергии зарядов ПВВ.

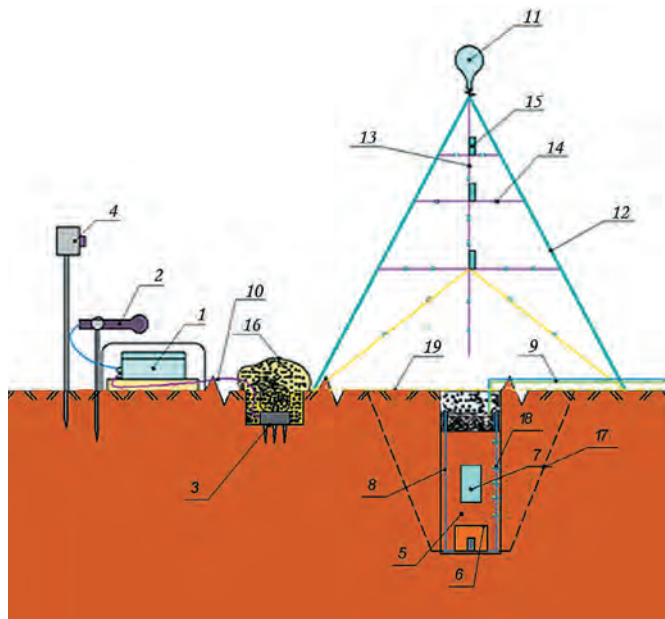
Методические аспекты расчета энергии, расходуемой на сейсмическое действие, и ударной воздушной волны рассмотрены в работах [5; 6; 23; 24].

При этом критерием оценки могут быть численные значения изменения долей энергии, расходуемых на дробление с целью формирования необходимого фракционного состава горных пород, и вредные формы работы взрыва, включая увеличение содержания ядовитых газов и мелкодисперсной пыли, образование некондиционных мелкодисперсных фракций, энергию, расходуемую на сейсмическое воздействие, и действие ударной воздушной волны.

На основе данных многочисленных перечисленных выше исследований [22–26] энергии, расходуемые на сейсмическое действие взрыва и ударную воздушную волну, могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$E_{сей} = K \int_{t_0}^t \left(\frac{sv^2}{2}\right) * 2 * \pi * R^2 * dt; E_{увв} = \frac{K}{\rho c} \int_{t_0}^t \Delta P^2 * dt * 2\pi R,$$

где  $E_{сей}$  и  $E_{увв}$  – полная энергия сейсмической волны, Дж/м<sup>2</sup>;  $s$  – плотность среды (породы), кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость векторная колебаний грунта;  $R$  – расстояние до прибора, м;  $\Delta P$  – избыточное давление, Па;  $2\pi R$  – площадь полусферы, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука, м/с;  $K$  – параметр, характеризующий суммарное численное значение коэффициентов, учитывающих свойства пород, трещиноватость массива, направление трещин, порядок инициирования скважин, высоту и материал забойки, диаметр, глубину и число скважин, применяемые средства и схемы инициирования зарядов, параметры замедления,



**Рис. 6**  
 Схема расположения устройств оценки вредных действий взрыва, отбора образцов пыли и газа из пылегазового облака при взрыве одиночного заряда на стадии испытаний в условиях полигона:  
 1 – сейсмограф Minimate Plus фирмы Instanтел; 2 – микрофон; 3 – сейсмоприемник; 4 – камера для скоростной съемки; 5 – заряд испытуемого ПВВ; 6 – шашка-детонатор; 7 – испытуемый элемент конструкции заряда, обеспечивающий снижение ореола распространения пылегазового облака; 8 – оболочка для заряда; 9 – провода для передачи импульса тока при замыкании датчика; 10 – провод для передачи данных сейсмоприемника; 11 – метеозонд; 12, 13 – оттяжки, удерживающие зонд и средства сбора образцов пыли и газа на необходимой высоте; 14 – фильтры для сбора образцов пыли на различной высоте; 15 – автономное устройство для отбора образцов газа; 16 – мешок с песком для создания давления на сейсмоприемник; 17 – граница воронки выброса; 18 – контактные датчики для измерения скорости детонации; 19 – поверхность участка полигона

**Fig. 6**  
 Layout of devices to assess the harmful blast effects, collect dust and gas samples from the dust and gas cloud while blasting a single charge during the testing stage in the test site conditions:  
 1 - the Minimate Plus seismograph by Instanтел; 2 - a microphone; 3 - a seismic receiver; 4 - a camera for high-speed imaging; 5 - a charge of the tested industrial explosive; 6 - the detonator stick; 7 - the tested element of the charge design, ensuring the reduction of the dust and gas halo; 8 - the charge shell; 9 - wires to transmit the current pulse when the sensor is short circuited; 10 - a wire to transmit the seismic receiver data; 11 - a weather probe; 12, 13 - suspenders holding the probe and the means to collect the dust and gas samples at the required height; 14 - filters to collect the dust samples at different heights; 15 - an autonomous gas sampling device; 16 - a sand bag to create pressure on the seismic receiver; 17 - the boundary of the emission funnel; 18 - contact sensors to measure the detonation velocity; 19 - the surface of the test site area

плотность ПВВ, величину зазора между стенкой скважины и зарядом.

Для формирования инновационных технологий ведения взрывных работ в современных условиях горного производства необходимо проводить комплексную оценку дробящего и вредных действий взрыва.

Испытания дробящего и техногенного действия взрыва одиночных скважинных зарядов производятся на полигоне с учетом ограничений по весу заряда или на отдельном



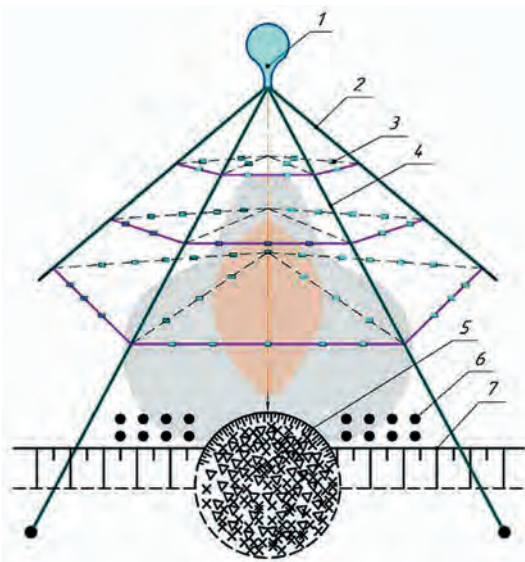
участке карьерного поля с применением принятой в организации, ведущей взрывные работы, техники и технологии буровзрывных работ. На данной стадии проведения экспериментальных работ производится оценка:

- работоспособности зарядов различной конструкции и вещественного состава по воронке выброса;
- сейсмического действия взрыва и ударной воздушной волны в ближней зоне действия взрыва;
- гранулометрического состава разрушенных взрывом на выброс пород;
- радиуса, глубины и объема воронки выброса при детонации скважинного заряда определенной конструкции и вещественного состава;
- скорости и радиуса разлета фрагментов взорванной горной массы;
- изменения во времени геометрических параметров пылегазового облака.

Кроме того, осуществляется отбор проб пыли и газа продуктов детонации при массовых взрывах. Конструкции заряда и ПВВ, прошедшие этап предварительных дополнительных испытаний на полигоне, рекомендуются для дальнейших промышленных испытаний.

На рис. 6 представлены схема расположения устройств оценки вредных действий взрыва, отбора образцов пыли и газа из пылегазового облака при взрыве одиночного заряда на стадии испытаний в условиях полигона.

Испытания дробящего и техногенного действия взрыва зарядов различной конструкции в производственных условиях производятся на месте производства взрывных работ с применением имеющихся средств механизации в количестве, предусмотренном проектом БВР. На рис. 7 представлена схема размещения устройств для сбора образцов пыли и газов при взрыве группы скважинных зарядов на уступе.



**Рис. 7**  
 Схема размещения устройств для сбора образцов пыли и газов при взрыве группы скважинных зарядов на уступе: 1 – метеозонд; 2, 4 – оттяжки, удерживающие зонд и средства сбора образцов пыли и газа 3 на необходимой высоте; 5 – развал взорванной горной породы; 6 – скважины; 7 – бровка уступа

**Fig. 7**  
 Layout of devices to collect the dust and gas samples while blasting a group of blast hole charges on the open-pit bench: 1 – a weather probe; 2, 4 – suspenders holding the probe and the means to collect the dust and gas samples (3) at the required height; 5 – the muck pile; 6 – blast holes; 7 – the bench edge

## Выводы

Современные условия и требования к эксплуатации горнотехнических систем требуют системного анализа геоэкологических последствий массовых взрывов. Как показали исследования ИПКОН РАН, увеличение веса одновременно взрывающегося ПВВ приводит к нелинейному увеличению нагрузки на атмосферу. В этой связи возрастает важность проведения исследований в области разработки энергоэффективных технологий дробления процессов горных работ и поиска безопасных способов их интенсификации при минимальных вредных последствиях массовых взрывов.

Для комплексной оценки полезного дробящего и вредных действий взрыва и поиску вариантов энергоэффективных технологий ведения буровзрывных работ необходимо применение методологии системного анализа и численной оценки потенциальной химической энергии ВВ, химических потерь в результате неполного химического превращения, баланса полезных форм работы взрыва на деформирование и разрушение горных пород и вредных действий энергии зарядов ПВВ. При этом критерием оценки могут быть численные значения изменения долей энергии, расходуемых на дробление с целью формирования необходимого фракционного состава горных пород, и вредные формы работы взрыва, включая увеличение содержания ядовитых газов и мелкодисперсной пыли, а также образование некондиционных мелкодисперсных фракций, энергию, расходуемую на сейсмическое воздействие и действие ударной воздушной волны.

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

В результате обработки видеозаписей пылегазового облака, образуемого различными ПВВ, установлен полиномиальный характер зависимостей изменения во времени высоты пылегазового облака и крупных фракций. Проведена сравнительная оценка содержания окислов азота. Исследования доказывают, 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 поризующих эмульсий топливных смесей. Такие составы обеспечивают повышение полноты химических преобразований и КПД взрыва за счет применения в составах гранулированных промышленных взрывчатых веществ вместо дизельного топлива специальных топливных смесей, содержащих поверхностно-активные вещества, увеличивающие на несколько порядков площадь контакта топлива и окислителя. Представлены фотографии микроструктуры плотной и пористой аммиачной селитры после обработки поризующей эмульсией.

В дальнейших исследованиях намечены работы по совершенствованию приборного обеспечения для проведения комплексных испытаний дробящего и вредных действий взрыва на полигоне и борту карьера.

**Список литературы / References**

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П., Перник П.М., Кишкина С.Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2000;(6):554–563.  
Adushkin V.V., Spivak A.A., Soloviev S.P., Pernik P.M., Kishkina S.B. Geo-ecological consequences of large-scale chemical blasts in open-pit mines. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2000;(6):554–563. (In Russ.)
2. 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>  
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>
3. Викторов С.Д., Казаков Н.Н., Закалинский В.М. Анализ методов управления процессом разрушения горных пород взрывом. *Горный журнал*. 1995;(7):46–47.  
Viktorov S.D., Kazakov N.N., Zakalinsky V.M. Analysis of methods to control the rock destruction process caused by blasting. *Gornyi Zhurnal*. 1995;(7):46–47 (In Russ.)
4. Мосинец В.Н. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1976. 271 с.
5. Цейллин Я.И., Смолий И.И. *Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов*. М.: Недра; 1981. 192 с.
6. Совмен В.К., Кутузов Б.Н., Марьясов А.Л., Эквист Б.В., Токаренко А.В. *Сейсмическая безопасность при взрывных работах*. М.: Изд-во «Горная книга»; 2012, 228 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/15703> (дата обращения: 04.10.2024).
7. Викторов С.Д., Закалинский В.М. Основы технологии разрушения высоких уступов крупномасштабными взрывами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(5):196–199.  
Viktorov S.D., Zakalinsky V.M. Fundamentals of technology to break high benches by large-scale blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(5):196–199. (In Russ.)
8. Трубецкой К.Н. Технологии управления горными работами в карьерах: перспективы развития. *Горный журнал*. 2013;(7):4–6.  
Trubetskoy K.N. Technologies to control mining operations in open pits: prospects for development. *Gornyi Zhurnal*. 2013;(7):4–6. (In Russ.)
9. Рылъникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(1):92–101.  
Ryl’nikova M.V., Vladimirov D.Y., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnologies as way of improving efficiency and ecologization of mineral resource management. *Journal of Mining Science*. 2017;53(1):84–91. <https://doi.org/10.1134/S1062739117011884>
10. Ефремовцев Н.Н. Особенности формирования множественных микро- и нанодисперсных систем гранулитов ЕФ и водоустойчивых эмульсионных ПВВ на их основе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(S4-14):17–22.  
Efremovtsev N.N. Features of formation of the multiple micro- and nano-dispersed systems granulites EPH and water resistant emulsion of industrial explosives on their basis. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(S4-14):17–22. (In Russ.)
11. Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Закалинский В.М., Рубцов С.К. Физико-технические основы и новые технологии разрушения высоких уступов крупномасштабными взрывами. *Записки Горного института*. 2007;171:13–22. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7656> (дата обращения: 04.10.2024).  
Trubetskoi K.N., Viktorov S.D., Zakalinskii V.M., Rubtsov S.K. Physical-technical bases and new technologies of high ledge destruction by large-scale explosions. *Journal of Mining Institute*. 2007;171:13–22. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7656> (accessed: 04.10.2024).
12. Жариков И.Ф., Шендеров А.И. Высокоуступная технология вскрышных работ с применением драглайнов. *Взрывное дело*. 2020;(128-85):91–104.  
Zharikov I.F., Shenderov A.I. High-ranking technology of the works with dragline. *Explosion Technology*. 2020;(128-85):91–104. (In Russ.)
13. Ковалев В.А., Федотенко В.С. Технологические аспекты перехода разрезов Кузбасса на ведение вскрышных работ высокими уступами. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(5):5–14.  
Kovalev V.A., Fedotenko V.S. Technological aspects of transition to high bench stripping in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2015;51(5):865–872. <https://doi.org/10.1134/S1062739115050015>
14. Ефремовцев Н.Н., Ефремовцев П.Н. Сейсмические и экологические факторы оптимизации управления кинетикой выделения энергии детонационными системами для обеспечения безопасного ведения взрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(S4-14):11–16.  
Efremovtsev N.N., Efremovtsev P.N. Seismic and ecological factors of optimization management the kinetics an energy detonation systems to ensure safe conducting explosive works. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(S4-14):11–16. (In Russ.)

15. Гриб Г.В., Позынич А.Ю., Гриб Н.Н., Петров Е.Е. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012;14(1-8):2112–2117. Режим доступа: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_2112\\_2117.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_2112_2117.pdf) (дата обращения: 04.10.2024).  
Grib G.V., Pazynich A.Y., Grib N.N., Petrov E.E. Dependence of the seismic explosive action in the rock massives on the technological conditions of drilling and blasting operations. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-8):2112–2117. (In Russ.) Available at: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_2112\\_2117.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_2112_2117.pdf) (accessed: 04.10.2024).
16. Fakhimi A., Lanari M. DEM-SPH simulation of rock blasting. *Computers and Geotechnics*. 2014;55:158–164. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.08.008>
17. Wang H., Wang Z., Wang J., Wang S., Wang H., Yin Y., Li F. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2021;156:103961. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103961>
18. Cheng P., Li Y., Lu C., Jiang S., Xu H. Study on blasting effect optimization to promote sustainable mining under frozen conditions. *Sustainability*. 2022;14(24):16479. <https://doi.org/10.3390/su142416479>
19. Li X., Liu K., Sha Y., Yang J., Hong Z. Numerical investigation on blast-induced rock fragmentation with different stemming structures. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2023;9:112. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00654-9>
20. Jiang N., Lv K., Gao Z., Jia C., Ye L., Meng S., Su Q. Experimental study on mechanical properties of single fracture-hole red sandstone. *Frontiers in Earth Science*. 2023;10:1083689. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1083689>
21. 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>  
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. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-61-68>
22. Михайлов В.А., Лобода А.И., Бересневич П.В., Борисов В.Г. Борьба с пылью в рудных карьерах. М.: Недра; 1981. 262 с.
23. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. М., Л.; 1976. 29 с.
24. Ганопольский М.И., Барон В.А., Смолий Н.И. *Вредные эффекты промышленных взрывов. Ударные воздушные волны при взрывных работах*. М.: Изд-во «Спутник +»; 2020. 288 с.
25. Гончаров А.И., Куликов В.И. Акустические волны при массовых взрывах в карьерах. *Физика горения и взрыва*. 2004;40(6):101–106. Режим доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c2c/c2c699a4b2d7c4f9ef5816e0d7bbf781.pdf> (дата обращения: 04.10.2024).  
Goncharov A.I., Kulikov V.I. Acoustic waves in bulk blasts in opencasts. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2004;40(6):702–706. <https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000048275.15055.84>
26. Меньшиков П.В. Воздействие ударной воздушной волны на здания и сооружения на земной поверхности. *Взрывное дело*. 2007;(97-54):77–82.  
Menshikov P.V. Impact of the air shock wave on buildings and structures located on the land surface. *Explosion Technology*. 2007;(97-54):77–82. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Федотенко Виктор Сергеевич** – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2082-6040>; e-mail: [victorfedotenko@gmail.com](mailto:victorfedotenko@gmail.com)

**Ефремовцев Никита Николаевич** – кандидат технических наук, действительный член Академии горных наук, член Научного совета РАН по проблеме народнохозяйственного использования взрыва, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [noee7@mail.ru](mailto:noee7@mail.ru)

**Харченко Анна Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3036-6663>; e-mail: [av-kharchenko@yandex.ru](mailto:av-kharchenko@yandex.ru)

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 07.10.2024

Поступила после рецензирования: 18.11.2024

Принята к публикации: 26.11.2024

#### **Information about the authors**

**Victor S. Fedotenko** – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2082-6040>; e-mail: [victorfedotenko@gmail.com](mailto:victorfedotenko@gmail.com)

**Nikita N. Efremovtsev** – Cand. Sci. (Eng.), 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)

**Anna V. Kharchenko** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3036-6663>; e-mail: [av-kharchenko@yandex.ru](mailto:av-kharchenko@yandex.ru)

#### **Article info**

Received: 07.10.2024

Revised: 18.11.2024

Accepted: 26.11.2024