

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ФРАГМЕНТАЦИИ ГОРНОЙ МАССЫ, ВЗОРВАННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ И ДЕТОНИРУЮЩЕГО ШНУРА

А.О. Брухавецкая

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия,  
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com

**Аннотация:** Проведен сравнительный анализ гранулометрического состава взорванной горной массы в аналогичных геологических условиях и при схожих параметрах буровзрывных работ (БВР) с применением различных систем инициирования, а именно неэлектрической системы инициирования (НСИ) и детонирующего шнура (ДШ). Основной фокус направлен на оценку качества фрагментации взорванной горной массы, так как этот критерий является одним из показательных и информативных для оценки результатов взрывных работ. Целью данного исследования является определение оптимальных параметров БВР при проведении взрывных работ с применением детонирующего шнура для достижения гранулометрического состава горной массы, аналогичного получаемому с применением неэлектрических систем инициирования. Актуальность данной работы заключается в участившихся случаях применения детонирующего шнура в качестве внутрискважинной линии в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ при взрывных работах открытым способом, что не применялось ранее. Возможные последствия применения ДШ в колонке заряда ЭВВ были оценены при анализе результатов гранулометрического состава в сравнении с результатами фрагментации при взрывании с использованием НСИ. Установлено, что в менее трещиноватом необводненном массиве в летний период качество дробления с применением детонирующего шнура аналогично качеству дробления при использовании НСИ. Также в рамках проведенного анализа даны рекомендации, согласно которым при отработке сдвоенными уступами лучше применять НСИ вместо ДШ. Установлено, что в определённых горно-геологических условиях и правильно подобранных параметрах БВР возможно применение ДШ взамен НСИ. Данное исследование может быть применимо в условиях разработки открытым способом.

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, открытые горные работы, неэлектрическая система инициирования, детонирующий шнур, эмульсионное взрывчатое вещество, параметры буровзрывных работ, кумулятивная кривая, функция Swabrec.

**Для цитирования:** Брухавецкая А. О. Сравнительный анализ степени фрагментации горной массы, взорванной с применением неэлектрических систем инициирования и детонирующего шнура // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 31–41. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_3\_0\_31.

---

## Comparative analysis of rock fragmentation by blasting using nonelectric initiation systems and detonating cords

A.O. Brukhavetskaya

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia,  
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com

---

**Abstract:** The article presents the comparative grain-size analysis of rocks after blasting in similar geological conditions and with similar blasting patterns but using different initiation systems, namely, nonelectric initiation and detonating cord. The spotlight is on the quality of rock fragmentation by blasting as this criterion is the most demonstrative and informative estimate of blasting efficiency. This study aims to determine optimum parameters of blasting with detonating cords so that the grain-size composition of blasted rocks is the same as in blasting with nonelectric initiation systems. The relevance of the study consists in the increasing frequency of application of detonating cords as the downhole lines in blastholes charges with emulsion explosives in open pit mining practices, that has never happened before. Probable consequences of the use of detonating cords in the column charge emulsion explosives were evaluated from the analysis of grain-size composition in comparison with fragmentation by blasting with nonelectrical initiation. It is found that the quality of blasting with detonating cords in more solid unwatered rock mass in summer is the same as in blasting with nonelectric initiation systems. Furthermore, for the double benching operations, it is recommended to use nonelectric initiation systems rather than detonating cords. It is also set that in certain geological conditions and with correctly selected blast designs, detonating cords can substitute nonelectrical initiation systems. The research findings are applicable for open pit mining.

**Key words:** grain-size composition, open pit mining, nonelectric initiation system, detonating cord, emulsion explosive, blast design, cumulative curve, the Swabrec function.

**For citation:** Brukhavetskaya A. O. Comparative analysis of rock fragmentation by blasting using nonelectric initiation systems and detonating cords. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(3):31-41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_3\_0\_31.

---

### Введение

При производстве буровзрывных работ в условиях открытых горных работ важно подбирать оптимальные параметры БВР (далее — буровзрывные работы), такие как сетка скважин, порядок иницирования, а также необходимо учитывать качество применяемых взрывчатых вещества и средств иницирования. Причиной этому служит то, что комплекс БВР определяет последующую эффективность всех технологических процессов и находится в прямой или косвенной зависимости от них [1].

Помимо всего, хорошей практикой является учет физико-технических параметров взрывааемых горных пород [2, 3]. К таким параметрам относятся крепость пород, взрываемость, обводненность, трещиноватость и т.д. Благодаря комплексному подходу возможно регулировать качество дробления взорванной горной массы и получать выход куска оптимальной крупности.

Данное исследование направлено на проведение сравнительного анализа результатов массовых взрывов в аналогичных условиях с применением различ-

ных средств инициирования, а именно неэлектрической системы инициирования (НСИ) и детонирующего шнура (ДШ) в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ.

В последнее время применение ДШ наряду с НСИ стало довольно распространенным явлением, так как многие горнодобывающие предприятия увеличили его потребление; поэтому определение оптимальных параметров БВР, при которых можно достичь качества фрагментации с применением ДШ, близкого к качеству фрагментации при использовании НСИ, является актуальным. Эту тенденцию можно отследить благодаря анализу оборота промышленных взрывчатых материалов в России, а именно по результатам ведения баланса производства, распространения и применения взрывчатых материалов промышленного назначения и пиротехнических изделий, который проводится раз в полгода Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). Согласно официаль-

ным статистическим данным ЕМИСС (рис. 1), потребление ДШ горнодобывающими предприятиями в 2022 г. увеличилось по сравнению с потребностью в 2021 г., противоположная картина наблюдается с другими средствами инициирования, расход которых уменьшился в 2022 г. по сравнению со значениями 2021 г.. Это происходит вследствие нехватки неэлектрических систем инициирования в России из-за сложной геополитической ситуации.

Детонирующий шнур широко применялся повсеместно в сочетании с различными шашками-детонаторами [4], но постепенно, начиная с 90-х годов прошлого столетия, ДШ стал вытесняться более удобными и безопасными неэлектрическими средствами инициирования, но еще до того, как НСИ стали использовать повсеместно, возникали сложности при их внедрении [5]. Применение НСИ и эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) происходило в России практически одновременно; так, в 80-х годах прошлого столетия ГПО «Кристалл» и

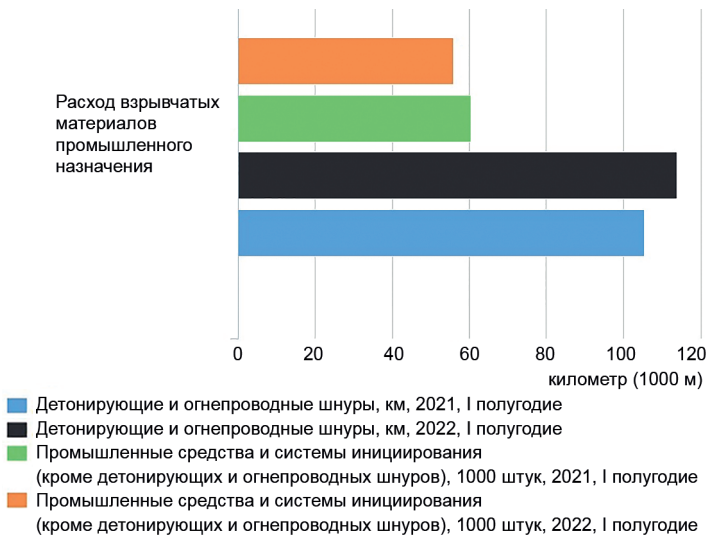


Рис. 1. Статистика расхода детонирующего шнура и других средств и систем инициирования за 2021 и 2022 гг. в России

Fig. 1. Statistics on the consumption of detonating cord and other initiation and initiation systems for the years 2021 and 2022 in Russia

КНИИМ были начаты работы по изготовлению эмульсионных взрывчатых веществ [6]. На сегодняшний день применение эмульсионных взрывчатых веществ получило широкое распространение, так как данный тип взрывчатого вещества (ВВ) обладает такими качествами, как высокая водоустойчивость, безопасность применения, возможность изменения энергетических характеристик в зависимости от условий применения [7]. Согласно данным [8], в 2020 г. в России из общего израсходованного количества взрывчатых веществ 67% приходится на эмульсионные ВВ, изготавливаемые на местах их применения.

По вышеупомянутой причине детальных исследований в области влияния детонирующего шнура на структуру ЭВВ нет. В связи с этим нет ясного понимания того, как влияет использование ДШ в скважинных зарядах ЭВВ на качество фрагментации.

Цель данного исследования заключается в определении параметров БВР, при которых результат фрагментации взорванной горной массы с применением детонирующего шнура будет аналогичным результатам фрагментации с использованием НСИ.

Результаты исследования могут быть полезны и применяться на горнодобывающих предприятиях при использовании в определенных геологических условиях и при определенных параметрах БВР ДШ вместо НСИ без большой потери качества гранулометрического состава, но при этом будет достигаться существенная экономия на средствах инициирования.

### **Методы исследования**

Изменение параметров БВР может привести к изменениям качества дробления взорванной горной массы как в лучшую, так и в худшую стороны. Поэтому регулирование буровзрывных па-

раметров и изменение физико-технических условий разработки месторождений имеют тесную взаимосвязь с качеством получаемой фрагментации взорванной горной массы при ведении взрывных работ [9].

Ранее проводимые исследования [10] выявили следующие закономерности: при проведении взрывных работ в карьере изначально с водообильным массивом дополнительная сезонная обводненность в виде осадков не сказывается отрицательным образом на качестве гранулометрического состава; напротив, при взрывании в необходимом массиве сезонная обводненность ухудшает качество фрагментации взрывающего массива.

Данное исследование расширяет горизонт факторов, которые могут повлиять на качество фрагментации. В данном случае помимо факторов сезонной обводненности, трещиноватости в качестве изменяющихся параметров принимаются средства инициирования, порядок инициирования.

Были проанализированы 12 массовых взрывов, произведенных в двух карьерах.

Крепость пород составляла 15–16 по шкале М.М. Протодяконова.

Карьер 1 и карьер 2 расположены на близком расстоянии друг от друга, но массив карьера 1 характеризуется средней трещиноватостью массива, порядка 10 трещин на погонный метр, массив не обводнен. В свою очередь карьер 2 сложен породами трещиноватыми (20 трещин на погонный метр), массив обводнен. По причине различной структуры массива карьер 1 разрабатывается более высокими уступами (15 м), а карьер 2 разрабатывается 12-метровыми уступами. Сетка скважин применяется различная, диаметры скважин — 230 и 250 мм. Также для постановки борта карьера в конечном положении на карьере 1 и ка-

рьере 2 производят взрывание сдвоенными уступами. На обоих карьерах в качестве взрывчатого вещества применяется эмульсионное взрывчатое вещество «Фортис» производства компании АО «Орика СиАйЭс». При использовании ДШ в качестве внутрискважинной линии применялось прямое инициирование, противоположная ситуация — при инициировании скважинных зарядов НСИ, где применяется обратное инициирование.

Существуют различные способы и приборы, с применением которых возможно произвести анализ качества гранулометрического состава. Автором статьи [11] был произведен обзор современных методов, одним из которых является фотопланометрический метод. Данный метод весьма распространен и заключается в определении количественных соотношений фракций различной крупности по поверхности, в предположении, что это характерно для всего объема. Для оценки качества взорванной горной массы использовался прибор PortaMetrics, реализующий фотопланометрический метод. Прибор PortaMetric широко применяется горнодобывающими предприятиями, с его помощью производят съемку активного забоя с последующим анализом изображения и формированием графика распределения крупности взорванной горной массы с применением функций Swebrec и Розина-Раммлера. Данное устройство подходит как при использовании в условиях открытых горных работ [10], так и в подземных условиях [12].

Вне зависимости от применяемого программного обеспечения, последовательность операций по обработке фотоматериала схожа с принципами обработки изображений в Portametrics [13–15].

В данном исследовании изучались кумулятивные кривые, построенные

по функции Swebrec. Функция Swebrec была предложена Оухтерлони в 2005 г. [16–18]. Основными составляющими данной функции являются: размер куска ( $x$ ); максимальный размер куска ( $X_{\max}$ ); класс крупности для прохождения 50% раздробленной горной массы ( $X_{50}$ ); степень однородности кривой распределения (степень волнистости кривой) ( $b$ ) [16]:

$$P_{\text{Swebrec}}(x) = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[ \frac{\ln(x_{\max} / x)}{\ln(x_{\max} / x_{50})} \right]^b \right\}}$$

при условии  $0 < x \leq x_{\max}$ .

Данная функция обладает следующими преимуществами: возможность использования одного распределения как для мелких, так и для крупных кусков породы [19]; также авторами [20] было установлено, что коэффициент детерминации при применении этой функции составляет более 0,99, что свидетельствует о том, что гранулометрический состав характеризуется довольно точно. По этим причинам графики распределения гранулометрического состава были построены с помощью данной функции.

Результаты двенадцати массовых взрывов были сгруппированы в три этапа по 4 взрыва в каждом. В таблице приведены параметры по каждому взрываемому блоку.

На 1-м этапе были проведены массовые взрывы (МВ) в летний период (при условии сезонной обводненности) на карьере 1. Для инициирования колонки использовались патроны-боевики с ДШ (1, 2) и НСИ (3, 4).

На 2-м этапе МВ были проведены также в условиях карьера 1, изменились параметры сезонности и высоты уступа. Блоки, взрывающиеся с использованием ДШ — 5 и 6; блоки, взрывающиеся с НСИ — 7 и 8.

На 3-м этапе массовые взрывы были проведены на карьерах 1 и 2, которые отличаются обводненностью и трещиноватостью.

### Результаты исследований

В общей сложности было проанализировано 12 массовых взрывов, разделенных на три этапа.

При анализе графика, соответствующего этапу 1 на рис. 2, видно, что все четыре кривые имеют схожий характер, линии пологие — это указывает на не-

однородное распределение гранулометрического состава. Красная кривая 2 наиболее пологая, что свидетельствует о неоднородном гранулометрическом составе, по сравнению с другими кривыми, напротив, фиолетовая кривая 4 более изогнутая, что указывает на более однородное распределение. Это также подтверждается значением показателя  $b$ : для кривой 4 этот показатель больше, чем у кривой 2. В целом все четыре кривые имеют схожий характер распределения.

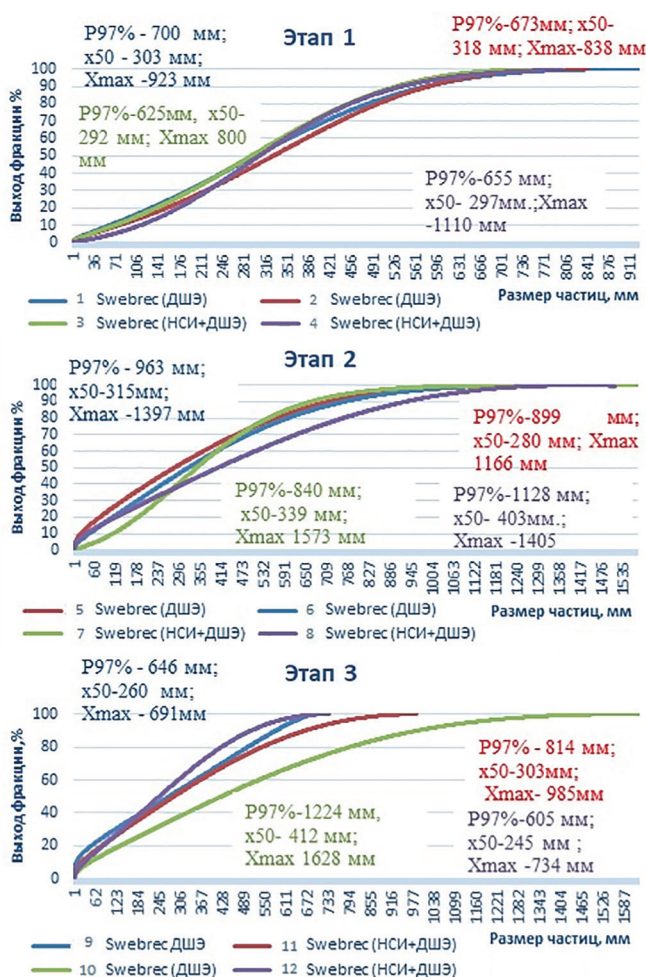


Рис. 2. Кумулятивные кривые, построенные с применением функции Swebrec  
 Fig. 2. Cumulative graphs based on the Swebrec function



**Основные показатели по 12 массовым взрывам**  
**Main figures for the 12 blasts**

№ блока	Карьер	Средства инициирования (внутрискважинные; поверхностные)	Порядок инициирования	Показатели закона распределения Swobres				Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа
				R97%, мм	X <sub>max</sub> , мм	X <sub>50</sub> , мм	b			
1	1	ДШ; ДШ	прямое	700,0	923,0	303,0	2,499	не обводнен	лето	15
2	1	ДШ; ДШ	прямое	673,0	838,0	318,0	2,340	не обводнен	лето	15
3	1	НСИ; ДШ	обратное	625,0	800,0	292,0	2,476	не обводнен	весна	15
4	1	НСИ; ДШ	обратное	655,0	1110	297,0	3,790	не обводнен	лето	15
5	1	ДШ; ДШ	прямое	899,0	1166	280,0	2,059	не обводнен	зима	30, сдвоенный уступ
6	1	ДШ; ДШ	прямое	963,0	1397,0	315,0	2,521	не обводнен	зима	15
7	1	НСИ; ДШ	обратное	840,0	1573,0	339,0	3,882	не обводнен	лето	30, сдвоенный уступ
8	1	НСИ; ДШ	обратное	1128	1405	403	2	не обводнен	лето	15
9	1	ДШ; ДШ	прямое	646,0	691	260	1,315	обводнен	зима	15
10	2	ДШ; ДШ	прямое	1224	1628	412	2,211	обводнен	лето	24, сдвоенный уступ
11	1	НСИ; ДШ	обратное	814,0	985	303	1,921	не обводнен	лето	15
12	2	НСИ; ДШ	обратное	605	734	245	2	обводнен	лето	36, сдвоенный уступ

Рассмотрим этап 2. В первую очередь сравним, как изменяется фрагментация при использовании различных систем инициирования. При парном сравнении кривых (НСИ 7, 8) с (ДШ 5, 6) видно, что при взрывании с ДШ линии на графике имеют аналогичную форму, кривые пологие с преобладающей мелкой фракцией. Также это подтверждается показателем  $x$  50–315 мм;  $x$  50–280 мм; медианное значение при взрывании ДШ меньше, чем при взрывании НСИ.

При анализе кривых НСИ отмечается разрозненный характер кривых, а именно зеленая кривая, которая соответствует взрыву на блоке 7, описывает лучшую фрагментацию взорванной горной массы по сравнению с другими кривыми, показатель степени однородности кривой в рассматриваемой группе максимальный и составляет  $b = 3,882$ .

Кривая, соответствующая блоку 8, описывает наихудшее распределение. Оба взрыва (7 и 8) были произведены в летний период, согласно исследованию [10], для карьера 1 качество фрагментации ухудшается при взрывании в летний сезон, что и подтверждают результаты взрыва 8. Что касается МВ 7, который также был произведен в летний период, но показал наилучший результат по однородности, то этот результат можно объяснить за счет взрывания сдвоенными уступами. Более крутые кривые, которые характеризуют более однородное распределение, были также отмечены в вышеупомянутой статье при взрывании сдвоенными уступами.

При анализе данных МВ наблюдается, что при использовании ДШ в качестве внутрискважинной линии кумулятивные кривые имеют схожий характер, соответствующий менее однородному распределению, что не относится к НСИ. Также при использовании ДШ максимальный размер куска уменьшается в сравнении с НСИ. При использовании

НСИ максимальный размер куска больше, чем при взрывании ДШ, но характер распределения более однородный (касательно зеленой кривой).

Этап 3. Сравним попарно результаты взрывов, произведенных в карьере 2, МВ (ДШ 10) и МВ (12 НСИ), условия взрывания аналогичные: летний период, обводненный и трещиноватый массив, со сдвоенными уступами 24 и 36 м. При взрывании ДШ наблюдается ухудшение качества взорванной горной массы, кривая распределения пологая. Напротив, при взрывании НСИ наблюдается вертикальный характер кривой, что свидетельствует об однородности гранулометрического состава. Также на блоке 10 наблюдается выход негабарита.

Далее сравним два взрыва, произведенные в карьере 2 и карьере 1 в летний период, при использовании НСИ. Параметры, по которым производится сравнение, это трещиноватый и обводненный массив. МВ 11 характеризуется средне-трещиноватым, необводненным массивом, МВ 12 сложен обводненным, трещиноватым массивом. Фиолетовая кривая (блок 12) описывает более однородное распределение гранулометрического состава, это связано с тем, что сезонная обводненность не влияет на качество дробления, так как блок был изначально обводнен; что касается блока 11, то в данном случае кумулятивная кривая более пологая с преобладанием более крупной фракции, это подтверждает тот факт, что сезонная обводненность в летний период отрицательно влияет на фрагментацию в сухих массивах.

Сравним МВ, произведенные на карьере 1 в летний сезон (блок 11 НСИ) и зимний сезон (блок 9 ДШ). Даже несмотря на применение ДШ при взрывании в зимний сезон синяя кривая 9 более крутая, чем красная 11.

Для ДШ характерен выход более мелкой фракции.



## Заключение

Закономерность, установленная в предыдущем исследовании автора [10], подтверждается: сезонная обводненность массива в летний период отрицательно сказывается на показателях фрагментации для карьера 1 с менее трещиноватым и необводненным массивом. Поэтому применение ДШ в данном случае рекомендуется, так как характер распределения гранулометрического состава при использовании НСИ и ДШ здесь имеет схожий характер.

При взрывании в аналогичных условиях установлено, что при использовании НСИ гранулометрический состав более однородный по сравнению с использованием ДШ.

При инициировании ДШ внутрискважинных зарядов происходит переизмельчение массива, но при этом вероятность

выхода негабаритов уменьшается. Вероятно, переизмельчение происходит в верхней части массива за счет прямого инициирования.

При взрывании сдвоенными уступами с применением НСИ фрагментация лучше, чем с использованием ДШ, возможной причиной этому являются сложные схемы монтажа и малый диапазон замедлений при взрывании ДШ, а также близкое расположение скважин друг к другу при формировании отрезной щели, что при использовании ДШ может привести к подбитию скважины, поэтому при заоткоске бортов рекомендуется применять НСИ.

Автор выражает благодарность сотрудникам группы компании «ЭВОБЛАСТ» за предоставленные консультации и рекомендации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маринин М. А., Рахманов Р. А., Аленичев И. А., Афанасьев П. И., Сушкова В. И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 6. — С. 111–125. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_111.
2. Доможиров Д. В. К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2023. — Т. 21. — № 1. — С. 5–14. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14.
3. Наимова Р. Ш., Норова Х. Ю., Мирзаев А. А. Обоснование влияния рациональной высоты отрабатываемого уступа на эффективность извлечения полезных ископаемых из недр // Взрывное дело. — 2021. — № 132/89. — С. 133–142.
4. Глинский В. П., Мардасов О. Ф., Мацевич Б. В., Шалыгин Н. К., Мохова Н. В. Опыт применения промышленных шашек-детонаторов // Горный журнал. — 2000. — № 2. — С. 46–47.
5. Григорьев А. В., Листопад Г. Г., Доильницын В. М., Попов В. К., Андреев В. В., Гусев А. Г. Опыт и перспективы применения неэлектрических средств инициирования на карьерах ОАО «Апатит» // Горный журнал. — 2001. — № 8. — С. 37–40.
6. Кутузов Б. Н. Перспективы совершенствования ассортимента промышленных ВВ для карьеров // Горный журнал. — 1996. — № 11-12. — С. 39–43.
7. Карабанов И. С., Добрынин И. А. Совершенствование рецептур эмульсионных взрывчатых веществ для подземных взрывных работ // Взрывное дело. — 2023. — № 140/97. — С. 36–48. DOI: 10.18698/0372-7009-2023-9-3.
8. Белин В. А. Сравнительная оценка подходов к регулированию промышленной безопасности при обороте взрывчатых материалов в РФ и США // Взрывное дело. — 2021. — № 132/89. — С. 143–163.
9. Wenjun Xia, Wenbo Lu, Ruize Li, Ming Chen, Zhen Lei Effect of water-decked blasting on rock fragmentation energy // Shock and Vibration. 2020, vol. 2020, article 8194801. DOI: 10.1155/2020/8194801.

10. Брухавецкая А. О. Анализ влияния параметров БВР на качество дробления горной массы // Взрывное дело. — 2022. — № 136/93. — С. 111—128.
11. Брухавецкая А. О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 18—31. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_18.
12. Ракишев Б. Р., Орынбай А. А., Мусахан А. Б. Гранулометрический состав массива пород и взорванной горной массы при различных шкалах крупности естественных отдельностей и кусков пород // Взрывное дело. — 2021. — № 132/89. — С. 7—26.
13. Дремин А. В., Великанов В. С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. — 2023. — № 4. — С. 73—78. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-73-78.
14. Guo Q., Wang Y., Yang S., Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm // Scientific Reports. 2022, vol. 12, article 7143. DOI: 10.1038/s41598-022-11351-0.
15. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 822—832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.
16. Ouchterlony F., Sanchidrian J. The fragmentation-energy fan concept and the swebrec function in modeling drop weight testing // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, vol. 5, pp. 3129—3156. DOI: 10.1007/s00603-018-1458-5.
17. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing // Mining Technology (Institution of Mining and Metallurgy). 2005, vol. 114, pp. 29—44.
18. Sanchidrian J., Ouchterlony F. Blast-fragmentation prediction derived from the fragment size-energy fan concept // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023, vol. 56, pp. 8869—8889. DOI: 10.1007/s00603-023-03496-9.
19. Маринин М. А., Афанасьев П. И., Сушкова В. И., Устименко К. Д., Ахметов А. Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 96—109. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_96.
20. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the Swebrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit // Metals. 2019, vol. 9, no. 813, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.2. **WAS**

## REFERENCES

- Marinin M. A., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A., Afanasyev P. I., Sushkova V. I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 111—125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_111.
- Domozhirov D. V. On the issue of increasing efficiency of mining and processing of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations to achieve quality requirements. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2023, vol. 21, no. 1, pp. 5—14. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14.
- Naimova R. S., Norova H. Y., Mirzaev A. A. Substantiation of the influence of the rational height of the worked ledge on the efficiency of extracting minerals from the subsurface. *Explosion technology.* 2021, no. 132/89, pp. 133—142. [In Russ].
- Glinky V. P., Mardasov O. F., Matseevich B. V., Shalygin N. K., Mokhova N. V. Experience in the use of industrial checkers-detonators. *Gornyi Zhurnal.* 2000, no. 2, pp. 46—47. [In Russ].
- Grigoriev A. V., Listopad G. G., Doilnitsyn V. M., Popov V. K., Andreev V. V., Gusev A. G. Experience and prospects of application of non-electric initiation at the open pits of JSC «Apatit». *Gornyi Zhurnal.* 2001, no. 8, pp. 37—40. [In Russ].
- Kutuzov B. N. Prospects of Improvement of the Range of Industrial BBs for Quarries. *Gornyi Zhurnal.* 1996, no. 11-12, pp. 39—43. [In Russ].
- Karabanov I. S., Dobrynin I. A. Improvement of formulating emulsion explosive for underground blasting. *Explosion technology.* 2023, no. 140/97, pp. 36—48. [In Russ]. DOI: 10.18698/0372-7009-2023-9-3.
- Belin V. A. Comparative assessment of approaches to the regulation of industrial safety in the turnover of explosive materials in the Russian Federation and the United States. *Explosion technology.* 2021, no. 132/89, pp. 143—163. [In Russ].

9. Wenjun Xia, Wenbo Lu, Ruize Li, Ming Chen, Zhen Lei Effect of water-decked blasting on rock fragmentation energy. *Shock and Vibration*. 2020, vol. 2020, article 8194801. DOI: 10.1155/2020/8194801.

10. Brukhavetskaya A. O. Analysis of the influence of drilling and blasting parameters on the quality of rock crushing. *Explosion technology*. 2022, no. 136/93, pp. 111 – 128. [In Russ].

11. Brukhavetskaya A. O. Current achievements in blasted rock fragmentation quality assessment: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5, pp. 18 – 31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_18.

12. Rākishev B. R., Orynbay A. A., Musakhan A. B. Granulometric composition of rock mass and blasted rock mass at different particle size scales of natural rocks and pieces of rocks. *Explosion technology*. 2021, no. 132/89, pp. 7 – 26. [In Russ].

13. Dremn A. V., Velikanov V. S. Regarding the particle-size composition of blasted rocks. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 4, pp. 73 – 78. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-73-78.

14. Guo Q., Wang Y., Yang S., Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 7143. DOI: 10.1038/s41598-022-11351-0.

15. Saadoun A., Frege M., Boukarm R., Haji R. Crush analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822 – 832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

16. Ouchterlony F., Sanchidrian J. The fragmentation-energy fan concept and the swebrec function in modeling drop weight testing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 5, pp. 3129 – 3156. DOI: 10.1007/s00603-018-1458-5.

17. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology (Institution of Mining and Metallurgy)*. 2005, vol. 114, pp. 29 – 44.

18. Sanchidrian J., Ouchterlony F. Blast-fragmentation prediction derived from the fragment size-energy fan concept. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023, vol. 56, pp. 8869 – 8889. DOI: 10.1007/s00603-023-03496-9.

19. Marinin M. A., Afanasyev P. I., Sushkova V. I., Ustimenko K. D., Akhmetov A. R. The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 96 – 109. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_1\_0\_96.

20. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the Swebrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 813, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.2.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Брухавецкая Алина Олеговна – аспирант,  
Университет науки и технологий МИСИС,  
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.O. Brukhavetskaya, Graduate Student,  
University of Science and Technology MISIS,  
119049, Moscow, Russia,  
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com.

Получена редакцией 18.12.2023; получена после рецензии 26.01.2024; принята к печати 10.02.2024.  
Received by the editors 18.12.2023; received after the review 26.01.2024; accepted for printing 10.02.2024.

