Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом

Вохмин С. А.^{1*}, Курчин Г. С.¹, Шевнина Е. В.¹, Кирсанов А. К.¹,
Костылев С. С.¹

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

*e-mail: svokhmin@mail.ru

Реферат

Введение. Буровзрывные работы являются первыми в цепи технологических процессов горного производства и в значительной мере определяют экономическую эффективность всего цикла процессов по добыче и первичной переработке полезных ископаемых на предприятии. На крупных горных предприятиях затраты на буровзрывные работы представляют собой значительную долю от общих затрат на добычу. В этом контексте один из главных технологических вопросов, стоящих сегодня перед горными инженерами – это снижение выхода негабаритной фракции после взрыва.

Цель работы. Настоящая работа направлена на развитие расчетных моделей прогнозирования гранулометрического состава отбиваемой горной массы как одного из начальных факторов сокращения экономических потерь во всем технологическом цикле.

Методология. Выполнен анализ параметров, влияющих на результаты фрагментации горной массы, и методик прогноза гранулометрического состава горной массы в ходе буровзрывных работ.

Результаты. В представленной работе дан краткий обзор данных о мировых объемах добычи полезных ископаемых; приведены сведения о добыче ключевых типов полезного ископаемого (минеральное топливо, черные металлы, цветные металлы, драгоценные металлы, строительные материалы), а также о выручке, полученной от их реализации. На примере отечественных компаний показаны подходы к решению вопросов прогнозирования выхода негабаритной фракции после взрыва.

Выводы. Задан вектор проведения будущих работ в направлении создания модели прогнозирования выхода горной массы определенной фракции после взрыва.

Ключевые слова: разрушение горных пород; взрыв; экономика; полезные ископаемые; гранулометрический состав; фрагментация.

Введение. В настоящее время объем достоверных запасов твердых полезных ископаемых (ПИ) достаточно велик, что является хорошей основой для создания качественно функционирующей экономики страны. В связи с этим подробный и объективный анализ ситуации с учетом глобальных тенденций развития горнодобывающей отрасли имеет решающее значение для определения потенциальных рисков при отработке месторождения.

Перспективная стратегия развития горнодобывающего предприятия напрямую зависит от сложности извлечения полезного компонента из недр (влияние горно-геологических и горнотехнических факторов), а также от стоимости добываемого сырья на товарной бирже. Однако существуют и косвенные геополитические факторы, способные привести к нехватке минеральных ресурсов.

Таким образом, подробные знания об объемах добычи полезных ископаемых и определенные компетенции в экономической отрасли в совокупности имеют немаловажное значение для принятия стратегических решений, поскольку изменения конъюнктуры рынка полезных ископаемых могут существенно отразиться на благополучии компании, отрасли или даже государства в целом.

Согласно [1], более половины добываемого сырья на данный момент приходится на Азиатский регион, далее следуют Северная Америка, Европа, Океания, Латинская Америка и Африка (табл. 1). При этом суммарный объем добычи в период с 1984 по 2017 г. практически удвоился, однако процентное соотношение добычи регионами остается неизменным.

По состоянию на 2017 г. в тройке мировых лидеров по объемам добычи полезных ископаемых и средств, вырученных от их реализации, находятся такие страны, как Китай, США и Россия (табл. 2).

Таблица 1. Объемы добычи полезных ископаемых по регионам за 2017 год
Table 1. Mineral output in the regions in 2017

Регион	Объем добычи, т	Часть от общего объема добычи, %	Прирост с 1984 г., %
Африка	966 256 214	5,62	50,84
Азия	9 962 352 619	57,95	36,35
Европа	1 459 912 535	8,49	160,54
Латинская Америка	1 127 948 810	6,56	49,82
Северная Америка	2 477 110 090	14,41	83,15
Океания	1 199 024 453	6,97	21,21
<i>Всего</i>	17 192 604 721	100,00	54,28

Исходя из изложенного можно прогнозировать, что объемы потребления будут расти, компании перейдут на отработку месторождений с более бедной сырьевой базой, что неминуемо повлечет за собой рост издержек на производство.

При этом расклад сил в ближайшей перспективе останется неизменным, и успешными будут те компании, регионы и страны, которые имеют технологическое преимущество, обеспечивающее им минимизацию себестоимости на каждом конкретном переделе или производственной операции.

Наибольшие объемы добычи полезных ископаемых приходятся на добычу открытым способом, что влечет за собой немало технологических и экологических проблем [2–4]. Одной из первостепенных технологических задач при отработке месторождения открытым способом является снижение выхода негабаритной фракции.

При увеличении объемов взрывных работ нередко происходит рост выхода негабаритной фракции. Это может обуславливаться ухудшением горно-геологических условий по мере увеличения глубины отработки, некорректно подобранными параметрами буровзрывных работ (БВР), что вызвано желанием сократить производственные затраты, и т. д. Данное явление порождает неконтролируемый рост дополнительных издержек на вспомогательные операции, что в целом негативно сказывается на экономической эффективности предприятия.

В связи с этим весьма актуальным является решение задачи прогнозирования выхода гранулометрического состава отбиваемой горной массы на основании известных горно-геологических и горнотехнических данных еще на этапе проектирования.

Методы исследования. Разрушение породного массива представляет собой начальное звено в технологической цепи производственных процессов, эффективность которого в значительной мере обуславливает производительность погрузочно-доставочного и горнотранспортного оборудования, а также косвенно оказывает влияние на показатели потерь и разубоживания руды. От эффективности взрывного дробления руды также непосредственно зависят и затраты на механическое ее дробление в процессе обогащения.

Качество выполнения взрывных работ оказывает непосредственное влияние на эффективность дробления горной массы. Это проявляется главным образом в значительном увеличении затрат на механическое дробление и измельчение руды, которые являются самыми энергозатратными процессами в горно-обогатительном производстве.

Доля затрат, приходящихся на отбойку, в зависимости от крепости горных пород может составлять 20–35 %. Факторами, предопределяющими рост этих затрат можно назвать:

- снижение выхода рудной массы с 1 м скважины;
- увеличение расхода взрывчатых материалов на 1 т отбитой руды;
- снижение производительности бурового оборудования (в метрах бурения или в кубических метрах обуренного горного массива).

Таблица 2. Объемы добычи полезных ископаемых и объем вырученных средств
Table 2. Mineral output and the amount of finance

Полезное ископаемое	Объем добычи, млн т			Объем выручки, млн долл. США		
	Российская Федерация	США	Китай	Российская Федерация	США	Китай
Минеральное топливо	1508,03	1888,68	3468,56	326 469	370 225	403 641
Черные металлы	59,88	30,12	336,03	8 989	3 284	36 223
Цветные металлы	4,75	3,09	42,03	12 732	12 241	97 956
Драгоценные металлы	1,68	1,27	3,92	14 728	10 587	19 143
Строительные материалы	32,03	91,39	192,25	8 363	8 096	21 644
<i>Всего</i>	1610,81	2013,64	4107,91	371 482	404 445	580 884

Необходимо также отметить, что каждое предприятие устанавливает свои собственные требования к кондиционной фракции (кондиционному куску) и, как следствие, к тому, какая фракция считается негабаритной. На эту величину оказывают влияние следующие факторы: тип применяемого горного и дробильного оборудования, используемое ВВ, тип и физико-механические свойства добываемого ПИ, и т. д.

Нормативное значение выхода негабаритов определяется на этапе разработки проекта производства работ (ППР) и обычно варьируется в диапазоне 1–5 %.

На сегодняшний день существует большое количество методик определения и прогнозирования фрагментации отбитой горной массы [5–10], однако отсутствует единая научно обоснованная расчетная модель по определению параметров БВР, учитывающая совокупность факторов, влияющих на результаты взрывной отбойки.

Результаты. В работе [11] проведены исследования по сравнению результатов расчетов среднего размера куска отбитой горной массы нескольких различных моделей прогнозирования в зависимости от включенных в рассматриваемую модель параметров.

В результате выполненного анализа рассматриваемых моделей были сделаны следующие выводы.

Общий вид выражения В. М. Кузнецова [6] для среднего размера куска следующий:

$$\bar{x} = A \left(\frac{V_0}{Q} \right)^{4/5} Q^{1/6}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от крепости породы; V_0 – объем горной массы, м^3 ; Q – масса ВВ в скважине, кг.

Рис. 1. Зависимости изменения среднего размера куска отбитой горной массы от крепости горной породы – a ; от объема горной массы – b
 Fig. 1. Dependencies of change in an average size of a lump taken down on the strength of rock – a ; on the volume of rock mass – b

При анализе результатов расчетов по данному методу определения среднего размера отбитой горной массы были установлены основные зависимости изменения среднего размера куска отбитой горной массы от крепости горной породы, отбиваемого объема горной массы и массы ВВ в скважине (рис. 1).

На графике (рис. 1, a) приведена кривая изменения среднего размера куска отбитой горной массы в зависимости от крепости породы. Поскольку в предлагаемой В. М. Кузнецовым модели крепость породы обозначена коэффициентом, объединяющим диапазоны крепости породы (формула (1)), то график зависимости имеет ступенчатый вид, что может говорить о непрямом воздействии данного

показателя на итоговое значение искомого среднего размера куска взорванной горной массы.

На рис. 1, б показана зависимость изменения среднего размера куска отбитой горной массы от величины отбиваемого объема горной массы при разных диапазонах крепости пород. Из графика следует, что при заряде ВВ в 300 кг и коэффициенте крепости $f = 15\text{--}20$ энергии взрыва должно хватить на разрушение $\approx 1000 \text{ м}^3$ горной породы, причем средний размер куска будет $\approx 0,9 \text{ м}$. В этих же условиях, но при крепости пород $f = 10$ отбитые 1000 м^3 породы по расчетам должны иметь среднюю крупность $\approx 0,7 \text{ м}$, а для $f = 5\text{--}0,5$ м.

Резюмируя результаты проведенного анализа расчетов по модели В. М. Кузнецова [6], можно сделать вывод, что данная модель не учитывает тип применяемого ВВ, параметры взрывной сети и физико-механические свойства горных пород (кроме крепости). Поэтому данная модель может быть использована только для укрупненных расчетов или при наличии большого статистического материала по каждому конкретному предприятию.

Модель Куз–Рам [5] является наиболее широко используемой моделью для прогнозирования фрагментации породы после взрывных работ. Эта модель состоит из следующих основных уравнений:

- выражение В. М. Кузнецова;
- выражение Розина–Раммлера;
- выражение индекса однородности.

Уравнение Каннингема имеет следующий вид:

$$\bar{x} = AK^{-0,8}Q^{1/6}\left(\frac{115}{RWS}\right)^{19/30},$$

где $\bar{x}$ – средний размер куска, см; A – фактор горной породы; K – удельный расход ВВ, кг/м³; Q – масса ВВ в скважине, кг; RWS – относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва по отношению к АНФО (*Ammonium Nitrate Fuel Oil* – это ВВ, произведенное как смесь пористой гранулированной аммиачной селитры с жидким горючим веществом); 115 – RWS тринитротолуола.

При анализе результатов расчетов по данному методу определения среднего размера отбитой горной массы были установлены основные зависимости изменения среднего куска отбитой горной массы от объемного веса породы, удельного расхода ВВ и массы ВВ в скважине (рис. 2).

Зависимость изменения среднего размера куска отбитой горной массы от объемного веса породы приведена на рис. 2, а. График представляет собой линейную зависимость.

Поскольку в данной расчетной модели коэффициент крепости горной породы A вычислен сразу по нескольким формулам и представляет собой не привычный отечественным исследователям показатель в виде шкалы крепости в диапазоне от 1 до 25, а некоторое численное значение, то последующие зависимости будут рассмотрены при изменении объемного веса горной породы.

На графике (рис. 2, б) отображена зависимость изменения среднего размера куска отбитой горной массы от удельного расхода взрывчатого вещества при разных численных показателях объемного веса горной породы. Данная зависимость построена для целика $RMD = 50$. Из графика следует, что при среднем удельном расходе ВВ, равном $1,0 \text{ кг/м}^3$, и объемном весе горной породы $\gamma = 1,5 \text{ т/м}^3$ средний размер кусков отбитой горной массы $\approx 1,2 \text{ м}$, при $\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$ – $1,4 \text{ м}$, при $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$ – $1,5\text{--}1,6 \text{ м}$ и при $\gamma = 3,0 \text{ т/м}^3$ – $1,7\text{--}1,8 \text{ м}$.

Анализируя модель Куз–Рам [5], можно сделать вывод, что имеющихся исходных данных вполне достаточно для точного прогнозирования фракции кусков гор-

ной породы после взрыва. При работе с данной моделью можно заложить прогнозируемые показатели фрагментации в процентном соотношении, а следовательно, возможно заранее узнать, какой процент определенной фракции можно ожидать после производства взрывных работ. Данную модель широко используют и совершенствуют многие ученые по всему миру, что говорит об ее универсальности.

Рис. 2. Зависимости изменения среднего размера куска отбитой горной массы от объемного веса породы – a ; от удельного расхода взрывчатого вещества – $б$

Fig. 2. Dependencies of change in an average size of a lump taken down on the volumetric weight of rock – a ; on the volume of rock mass – $б$

Модель КСО [12] является расширенной версией модели Куз–Рам. В этой модели заменяется функция Розина–Раммлера, используемая для описания кривой фрагментации, на функцию Swebres. Функция Swebres включает в себя три основных параметра: максимальный размер $x_{\max}$; класс измельчения x_{50} ; степень волнистости кривой b .

Функция Swebres определяется как

$$P(x) = \left[1 + \left(\ln(x) / \ln \frac{x_{\max}}{x_{50}} \right)^b \right]^{-1},$$

где $P(x)$ – количество материала, проходящего через сито размером x , %; b – степень волнистости кривой.

Модель была названа Кузнецов–Каннингем–Оучтерлони (Kuznetsov–Cunningham–Ouchterlony) – КСО.

Данная модель подразумевает не прогнозирование выхода определенной фракции после взрыва (то есть численный показатель среднего размера куска отбитой горной массы), а вероятность прохождения отбитой горной массы через просеивающую поверхность грохота при различном размере отверстий просеивающей поверхности.

Рис. 3. Зависимости вероятности прохождения куска отбитой горной массы через просеивающую поверхность грохота от индекса однородности – *a*; от размера отверстий просеивающей поверхности грохота – *б*
Fig. 3. Dependencies of the probability of a crushed rock lump passing through the screen deck of a screen on the uniformity index – *a*; on the size of screen deck holes – *б*

При анализе результатов расчетов по данному методу определения выхода отбитой горной массы в подрешетный продукт грохота были установлены ее основные зависимости от индекса однородности и размера отверстий просеивающей поверхности (рис. 3).

График (рис. 3, *a*) показывает зависимость вероятности прохождения куска среднего размера отбитой горной массы через просеивающую поверхность грохота от индекса однородности. Как видно из данного рисунка, с увеличением индекса однородности происходит уменьшение вероятности просеивания куска среднего размера отбитой горной массы через просеивающую поверхность гро-

хота. При максимальном размере сита 1000 мм вероятность прохождения через просеивающую поверхность грохота варьируется в диапазоне от 8 до 46 %.

График (рис. 3, б) показывает зависимость вероятности прохождения кусков отбитой горной массы через просеивающую поверхность грохота от размера отверстий просеивающей поверхности грохота. Вероятность прохода через просеивающую поверхность грохота варьируется от 42 до 90 % (в зависимости от размера отверстий просеивающей поверхности грохота).

По итогам анализа модели КСО [12] можно сделать вывод, что эту и другие аналогичные модели рекомендуется использовать в дополнение к моделям, позволяющим рассчитывать характеристики крупности отбитой горной массы. Такая интеграция моделей позволит горнодобывающему предприятию заранее предсказывать возможные проблемы с фрагментацией.

Как правило, в представленных моделях слабо учитывается взаимовлияние факторов, чем и объясняется нестабильность показателей БВР, низкая их эффективность и, как следствие, повышенный выход негабаритов. Поэтому в настоящее время широко обсуждается тема анализа и разработок методик, позволяющих прогнозировать гранулометрический состав отбиваемой горной массы как одного из начальных факторов сокращения экономических потерь в технологическом цикле.

Обсуждение. В целом, параметры, которые могут повлиять на результаты фрагментации горной массы, можно разделить на две основные группы – контролируемые и неконтролируемые, а также четыре подгруппы (параметры БВР; характеристики ВВ; характеристики горного массива; геомеханические характеристики ненарушенной горной породы) [13–16].

В настоящее время зависимость среднего размера куска отбитой горной массы от используемых параметров буровзрывных работ и свойств пород определяется для каждого горного предприятия по эмпирическим закономерностям на основе опыта предприятий-аналогов, а его рациональные значения на действующем предприятии – путем проведения ряда опытно-промышленных взрывов.

Обзор существующих методик определения фрагментации отбитой горной массы показал, что на сегодняшний день отсутствует единая научно обоснованная методика по определению данного параметра. Как правило, предлагаемые методики не учитывают взаимовлияние ряда факторов, таких как физико-механические свойства массива, тип применяемого взрывчатого вещества, диаметр заряда, конструкция заряда, место инициирования заряда, длина и величина недозаряда, длина и качество забойки, взаимодействие одновременно взрывающихся зарядов. Этим объясняется нестабильность показателей буровзрывных работ, низкая их эффективность и, как следствие, повышенный выход негабаритов.

Поэтому в настоящее время в научных кругах широко развивается тема разработки как технологически и экономически эффективной методики дробления негабаритной фракции, так и методики учета параметров разрушения, позволяющей снизить удельный расход взрывчатого вещества и повысить безопасность взрывных работ.

Заключение. Совершенствование БВР является одним из направлений повышения эффективности отработки месторождения. В зависимости от того, насколько корректно рассчитаны параметры БВР, могут существенно изменяться технико-экономические показатели отработки блока [17].

Исходя из изложенного можно сделать вывод, что объемы добычи неуклонно растут, вместе с тем повышается и спрос на создание более мощных взрывчатых веществ и разработку новых моделей (методик), способствующих прогнозированию или определению гранулометрического состава отбиваемой горной массы.

При реализации внутренней стратегии развития на предприятиях следует регулярно проводить анализ технико-экономических показателей работы. Анализ должен способствовать изменению ориентации экономической политики предприятия от преимущественно затратной к ресурсосберегающей и экологически безопасной.

Необходимо изучить большое количество моделей прогнозирования выхода гранулометрического состава отбиваемой горной массы, что позволит получить более детальную картину о влиянии основных факторов на результаты взрыва. Действенность такого анализа зависит не только от совершенства методов, но и от оперативности его проведения. При современных темпах развития науки и техники необходимо быстро воздействовать на производство. Отсюда основными требованиями анализа являются его системность, комплексность и оперативность [18].

Работа в данном направлении ведется в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-1178.2018.8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reichl C., Schatz M., Zsak G. World Mining Data. Vol. 34. Mineral production. Vienna, 2019. 264 p.
2. Федорко В. П. Методологические проблемы технологии открытых горных работ: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 1998. 200 с.
3. Крюков Г. М., Докутович М. И., Жаровонко С. Н. Степень дробления и выход негабарита при взрывном рыхлении горных пород на карьерах // ГИАБ. 2011. № 5. С. 347–351.
4. Курчин Г. С., Волков Е. П., Зайцева Е. В., Кирсанов А. К. Проблемы экологии при добыче нерудных строительных материалов в России // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 45–57.
5. Cunningham C. V. B. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. In: Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting. 1987. P. 475–478.
6. Kuznetsov V. M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock // Soviet Mining Science. 1973. Vol. 9. No. 2. P. 144–148.
7. Кирсанов А. К., Сиделев Н. А., Вохмин С. А., Курчин Г. С. Обзор существующих методик дробления горных пород до требуемого кондиционного размера // Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: ЗапСибНЦ, 2016. С. 16–19.
8. Кузнецов В. А. Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зонирования взрывааемых уступов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 225 с.
9. Рождественский В. Н. Прогнозирование качества дробления трещиноватых горных массивов при многорядном взрывании зарядов // Технология и безопасность взрывных работ. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. С. 38–43.
10. Шапурин А. В., Васильчук Я. В. Математическая модель для прогнозирования гранулометрического состава взорванных горных пород // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2012. Вип. 4(75). С. 94–99.
11. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Lobatsevich M. A., Shigin A. O., Shigina A. A. Prospects of the use of grain-size composition predicting models after explosion in open-pit mining // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. Vol. 9. Issue 4. P. 1056–1069.
12. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology (Trans. of the inst. of Mining and Metallurgy A). 2005. Vol. 114. P. 29–44.
13. Bakhtavar E., Khoshrou H., Badroddin M. Using dimensional-regression analysis to predict the mean particle size of fragmentation by blasting at the Sungun copper mine // Arab. J. Geosci. (2015) 8: 2111–2120. doi:10.1007/s12517-013-1261-2.
14. Chakraborty A. K., Raina A. K., Ramulu M., Choudhury P. B., Haidar A., Sahu P., Bandopadhyay C. Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations // Eng. Geol. 2004. 73: 105–116.
15. Kulatilake P., Qiong Wu., Hudaverdi T., Kuzu C. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks // PHSW. Eng. Geol. 2010. 114: 298–311.
16. Latham J. P., Mculcn J. V., Dupray S. Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armoustone production // Eng. Geol. 2006. 87: 60–74.
17. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. 13. P. 3978–3986.
18. Проблемы разработки целостной структуры горных наук и теории горного производства. URL: <https://articlekz.com/article/5435> (дата обращения 29.05.2019).

Сведения об авторах:

Вохмин Сергей Антонович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета. E-mail: svokhmin@mail.ru

Курчин Георгий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета. E-mail: kurchings@mail.ru

Шевнина Екатерина Васильевна – старший преподаватель кафедры шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета. E-mail: ek_zaytseva@mail.ru

Кирсанов Александр Константинович – ассистент кафедры шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета. E-mail: akirsanov@sfu-kras.ru

Костылев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры шахтного и подземного строительства Сибирского федерального университета. E-mail: sergey.kostylevv@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24

Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining

Sergei A. Vokhmin¹, Georgii S. Kurchin¹, Ekaterina V. Shevnina¹, Aleksandr K. Kirsanov¹,
Sergei S. Kostylev¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

Introduction. Drilling and blasting operations are first in the workflow and significantly determine the economic efficiency of the entire mining and primary processing workflow in the enterprise. The cost of drilling and blasting operations is a significant part of total production costs of large mining companies. In this context, mining engineers today are facing a crucial technological problem, i.e. the reduction of the off-gauge fraction yield after the explosion.

Research aims to develop the models which forecast the granulometric composition of the rock mass taken down as the original factor in reducing the economic waste of the entire workflow.

Methodology. The parameters which influence the results of rock mass fragmentation and the techniques of rock mass granulometric composition forecasting in the course of drilling and blasting were analyzed.

Results. The present paper gives a brief overview of the global mineral output; provides information on the extraction of key types of minerals (mineral fuel, ferrous metals, non-ferrous metals, precious metals, and construction materials), as well as revenues derived from their sale. On the example of domestic companies, approaches to the issue of forecasting the off-gauge fraction yield after the explosion.

Summary. Direction for future actions in creating the model forecasting rock mass yield of a certain fraction after the explosion.

Key words: rock destruction; explosion; economics; mineral resources; granulometric composition; fragmentation.

Acknowledgements. Work in this direction is being carried out under the government grant of RF President for governmental support of young Russian scientists PhD (MK-1178.2018.8).

REFERENCES

1. Reichl C., Schatz M., Zsac G. World Mining Data. Vol. 34. Mineral production. Vienna, 2019. 264 p.
2. Fedorko V. P. *Methodological problems of opencast mining technology: DSc. Eng. Diss. Irkutsk*; 1998. (In Russ.)
3. Kriukov G. M., Dokutovich M. I., Zharovonko S. N. Crushing ratio and the yield of the off-gauge fraction during explosive loosening of rock at open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; 5: 347–351. (In Russ.)
4. Kurchin G. S., Volkov E. P., Zaitseva E. V., Kirsanov A. K. Environmental problems in the extraction of nonmetallic building materials in Russia. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia = Modern Problems of Science and Education*. 2013; 6: 45–57. (In Russ.)
5. Cunningham C. V. B. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. In: *Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*. 1987. P. 475–478.
6. Kuznetsov V. M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science*. 1973; 9 (2): 144–148.
7. Kirsanov A. K., Sidelev N. A., Vokhmin S. A., Kurchin G. S. Review of existing techniques of rock crushing up to the required size. In: *Basic scientific research: theoretical and practical aspects: Proceedings of Internat. Research.to-Pract. Conf.* Kemerovo: ZapSibNTs Publishing; 2016: 16–19. (In Russ.)
8. Kuznetsov V. A. *Rationale for the technology of drilling and blasting in quarries and opencast mine workings based on deformational zoning of the demolished benches: DSc. Eng. Diss.* Moscow; 2010. (In Russ.)
9. Rozhdestvenskii V. N. Forecasting the quality of crushing jointed rock masses at multi-row blasting. In: *Technology and Safety of Blasting*. Ekaterinburg: IM UB RAS; 2012: 38–43. (In Russ.)

10. Shapurin A. V., Vasilchuk Ia. V. Mathematical model for blasted rock granulometric composition forecast. *Visnik KrNU imeni Mikhaila Ostrogradskogo = Transactions of Kremchuk Mychailo Ostrohradskyi National University*. 2012; 4(75): 94–99.
11. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Lobatsevich M. A., Shigin A. O., Shigina A. A. Prospects of the use of grain-size composition predicting models after explosion in open-pit mining. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2018; 9 (4): 1056–1069.
12. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology (Trans. of the inst. of Mining and Metallurgy A)*. 2005; 114: 29–44.
13. Bakhtavar E., Khoshrou H., Badroddin M. Using dimensional-regression analysis to predict the mean particle size of fragmentation by blasting at the Sungun copper mine. *Arab. J. Geosci.* 2015; 8: 2111–2120.
14. Chakraborty A. K., Raina A. K., Ramulu M., Choudhury P. B., Haidar A., Sahu P., Bandopadhyay C. Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations. *Eng. Geol.* 2004; 73: 105–116.
15. Kulatilake P., Qiong Wu., Hudaverdi T., Kuzu C. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks. *PHSW. Eng. Geol.* 2010; 114: 298–311.
16. Latham J. P., Mculen J. V., Dupray S. Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armourstone production. *Eng. Geol.* 2006; 87: 60–74.
17. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12 (13): 3978–3986.
18. *The problems of developing the integrated structure of mining sciences and the theory of mining industry*. Available from: <https://articlekz.com/article/5435> [Accessed 29 May 2019].

Received 31 May 2019

Information about authors:

Sergei A. Vokhmin – PhD (Engineering), Professor, Head of the Underground Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: svokhmin@mail.ru

Georgii S. Kurchin – PhD (Engineering), associate professor, Underground Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: kurchings@mail.ru

Ekaterina V. Shevnina – senior lecturer, Underground Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: ek_zaytseva@mail.ru

Aleksandr K. Kirsanov – assistant lecturer, Underground Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: akirsanov@sfu-kras.ru

Sergei S. Kostylev – PhD student, Underground Mining Department, Siberian Federal University. E-mail: sergey.kostylevv@gmail.com

Для цитирования: Вохмин С. А., Курчин Г. С., Шевнина Е. В., Кирсанов А. К., Костылев С. С. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 14–24. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24

For citation: Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Shevnina E. V., Kirsanov A. K., Kostylev S. S. Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 1: 14–24 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24