

РАСЧЕТ ЛИНИИ НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ПЕРВОМУ РЯДУ СКВАЖИН ПРИ ВЗРЫВАНИИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ УЧЕТА РАДИУСОВ ЗОН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

В.А. Ишейский¹, Д.Э. Рядинский¹, Г.С. Магомедов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² АО «Гавриловское Карьероуправление», п. Гаврилово, Россия

Аннотация: При разработке карьеров строительных материалов, особенно при добыче гранита для строительных целей, недропользователи сталкиваются с проблемой выхода негабаритных фракций при взрывании сложноструктурных массивов. Такие массивы обладают сложной морфологией и неоднородной блочной структурой, а взрываемый участок может содержать различные группы пород с весьма изменчивой трещиноватостью. Кроме того, сам гранит может иметь различные свойства, что дополнительно усложняет процесс взрывания и последующего формирования однородной фрагментации. В результате разупрочнения таких сложноструктурных массивов энергией взрыва существует высокая вероятность образования негабаритных фракций. Кроме зон нерегулируемого дробления и линии отрыва блока, негабаритные фракции часто образуются в области первого ряда скважин. Материал статьи является продолжением исследования, направленного на повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываемого массива. Изложены теоретические выкладки, подходы и особенности расчета линии наименьшего сопротивления по первому ряду скважин при взрывании сложноструктурных массивов на основе учета интенсивности изменения прочности пород в зависимости от степени трещиноватости, которая, в свою очередь, влияет на размеры зоны трещинообразования.

Ключевые слова: взрыв, взорванная горная масса, карьер, блочность, трещиноватость, гранулометрический состав, сложноструктурный массив, линия наименьшего сопротивления, выход негабаритной фракции.

Для цитирования: Ишейский В. А., Рядинский Д. Э., Магомедов Г. С. Расчет линии наименьшего сопротивления по первому ряду скважин при взрывании сложноструктурных массивов на основе учета радиусов зон трещинообразования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 64–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_64.

Calculation of burden by the first row of blastholes in complex-structure rock mass blasting with regard to cracked zone radii

V.A. Isheisky¹, D.E. Ryadinskii¹, G.S. Magomedov²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² JSC «Gavrilovskoe Quarry Administration», Gavrilovo, Russia

Abstract: In quarrying construction materials, especially in excavation of granite for building purposes, subsoil users face the problem connected with high oversize amount generated in blasting of structurally complex rock masses. Such rock masses possess complex morphology and nonuniform block structure, and a blasting site can contain different type rocks with highly variable jointing. For another thing, granite itself can have differing properties, which even more complicates blasting and worsens uniformity of fragmentation. As a result of weakening of such complex-structure rock mass by energy of explosions, generation of oversize fractions is highly probable. Together with zones of unstable fragmentation and block detachment, oversize fragments are often generated in the region of the first row of blastholes. This article continues the research aimed at improved quality of rock fragmentation by blasting through introduction of structural peculiarities of rock mass into consideration. The article sets forth theoretical calculations, approaches and features of computation of burden by the first row of blastholes in blasting of structurally complex rock masses with regard to the change in the strength of rocks depending on the rate of their jointing, which, in its turn, influences the size of the cracked zones.

Key words: blast, broken rock mass, open pit mining, jointing, fracturing, grain size composition, structurally complex rock mass, burden, oversize yield.

For citation: Isheisky V. A., Ryadinskii D. E., Magomedov G. S. Calculation of burden by the first row of blastholes in complex-structure rock mass blasting with regard to cracked zone radii. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):64-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_64.

Введение

Акцент исследования сфокусирован на обоснованном выборе линии наименьшего сопротивления (ЛНС) для эффективной отбойки горной массы, обеспечивающей равномерность дробления и минимальный выход негабаритных фракций по первому ряду скважин при взрывании сложноструктурных массивов. Высокий выход негабаритных фракций в области первого ряда, как правило, является следствием завышенных расстояний между осями взрывных скважин и ближайшей свободной поверхностью [1, 2]. Завышение значений ЛНС чаще

всего происходит из-за недостаточно обоснованного выбора расчетных формул на стадии проектных решений, не учитывающих все многообразие факторов и условий, влияющих на реальную картину формирования области разрушения [3, 4] и базирующихся на эмпирических результатах, полученных в отличных от фактических условиях проведения взрыва.

В условиях неоднородной литологии, блочной структуры и резко изменчивой трещиноватости в объеме горных пород, приходящихся на одну скважину, что свойственно сложноструктурным массивам

вам, необоснованно принимать значение ЛНС по первому ряду скважин лишь по одному типу пород или базироваться на одном показателе блочности или трещиноватости [5 – 7].

Для формирования равномерного granulометрического состава необходимо идентифицировать доминирующую область с наименьшей трещиноватостью и блочностью [8 – 10]. В таких зонах повышается вероятность выхода негабаритных фракций. Следует оценить вклад этой зоны в общий объем разрушения и определить её влияние на эффективность проработки и дробления массива [11 – 13].

Так, В.А. Малых указывает на влияние на взрывааемых участках (в порядке значимости) удельного расхода ВВ, физико-механических свойств и структурных особенностей пород. Г.П. Демидюк утверждает, что для точного прогноза результатов взрыва следует учитывать различия в физико-механических и структурных особенностях породы на разных уровнях уступа, поскольку ЛНС не отражает полноценно параметры дробления [14].

Авторами статьи [15] предложен учет напряженно-деформированного состояния массива, условий зарождения трещин, коэффициента перекрытия скважин, отклонения скважин при бурении для расчета оптимальных геометрических параметров скважинных зарядов и их размещения на блоке для эффективного разделения гранитных блоков.

На основе изучения вышеуказанного представляется возможным получить обоснованные значения ЛНС по первому ряду скважин с применением оперативной геологической информации [1] по каждой скважине в рамках одного взрывааемого блока и индивидуально определить проектные положения скважин первого ряда, обеспечивающие оптимальный результат дробления с мини-

мальным дополнительным повторным взрыванием и доведением до кондиций образованных негабаритных фракций.

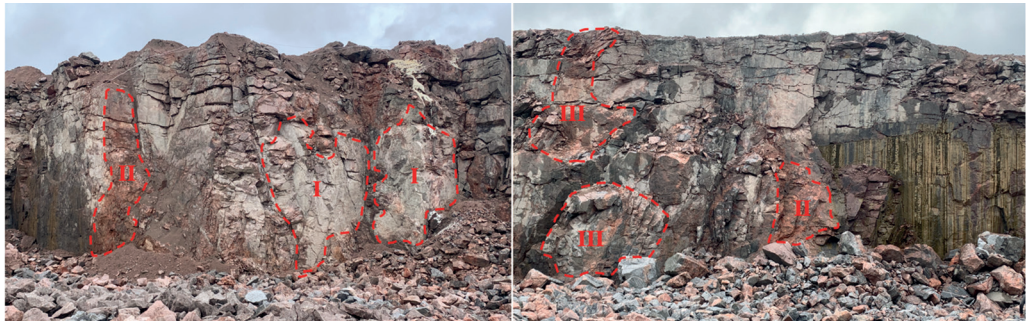
В статье [1] авторским коллективом представлены подход и методология сбора геолого-структурных данных, показателей естественной блочности и трещиноватости взрывааемых массивов на основе фотограмметрических методов [16, 17] с использованием программных продуктов с открытым кодом [18].

В продолжение цикла научных статей по результатам исследований по снижению выхода негабаритных фракций и обеспечения равномерного дробления массива энергией взрыва, проведенных в условиях карьера по добыче строительных материалов АО «Гавриловское карьероуправление» (далее «Гавриловское КУ») [1 и др.], в данной работе содержатся теоретические выкладки и особенности расчета ЛНС по первому ряду скважин на основе корреляции между степенью трещиноватости пород и интенсивностью изменения их прочности [19], что позволяет более точно предсказывать размеры зоны трещинообразования и, как следствие, повышать эффективность взрывных работ в сложно-структурных горных массивах.

Объект исследования

В рамках исследований по снижению выхода негабаритных фракций и обеспечению равномерного дробления массива энергией взрыва [1] объектом исследования в данной работе являются параметры буровзрывных работ, в частности проектные параметры ЛНС, базирующиеся на структурных особенностях взрывааемого массива и физико-механических свойствах пород.

Сложноструктурный массив «Гавриловского КУ» состоит из трех типов гранитов — красного, красно-серого и серого с отличающимися физико-механическими свойствами (табл. 1), раз-



I – серый гранит; II – красный гранит; III – красно-серый гранит

Рис. 1. Откос уступа Гавриловского КУ [составлено авторами]

Fig. 1. Bench slope of the Gavrilovsky (KM) [compiled by the authors]

Таблица 1

Физико-механические свойства гранитов [составлено авторами]

Physical and mechanical properties of granites [compiled by the authors]

№ п/п	Параметр	Обозначение	Красно-серый гранит	Серый гранит	Красный гранит
1	Модуль Юнга, ГПа	E	1,9	5,27	2,53
2	Коэффициент Пуассона	ν	0,2	0,2	0,16
3	Предел прочности при растяжении, МПа	σ_t	21	15,6	25,0
4	Предел прочности при сжатии, МПа	$\sigma_{сж}$	189	125	201
5	Показатель хрупкости	K_p	0,9	0,7	0,9

личной трещиноватостью и размерами естественной блочности [20 – 22]. Для более полного представления сложного геологического и структурного строения массива на рис. 1 представлен типовой пример уступа, подлежащий взрыванию. Исходя из морфологии представленных примеров откосов уступов, складывается понимание о сложных условиях проведения взрывных работ по первому ряду скважин, а именно в контексте прохождения траекторий осей скважин по разным геолого-структурным условиям горного массива как в рамках одной скважины по глубине, так и между соседними скважинами первого ряда.

Методы

Авторами выявлены причинно-следственные связи между факторами, влия-

ющими на фрагментацию породы от взрыва.

Факторы, влияющие на дробление горных пород при взрывных работах, были расположены упорядоченно, а направления влияния между ними указаны стрелками. Стрелки не рисовались, если между факторами не было связи. Полученная диаграмма взаимосвязей представлена на рис. 2.

Для каждого фактора четко фиксировалось количество стрелок — входящих (вызывающих факторов) и выходящих (влияющих факторов). Затем было получено общее количество стрелок, сумма количества входящих и исходящих стрелок для каждого фактора. Всем стрелкам был присвоен одинаковый вес, равный 1.

Затем процентный вклад каждого фактора в дробление породы при взрывных

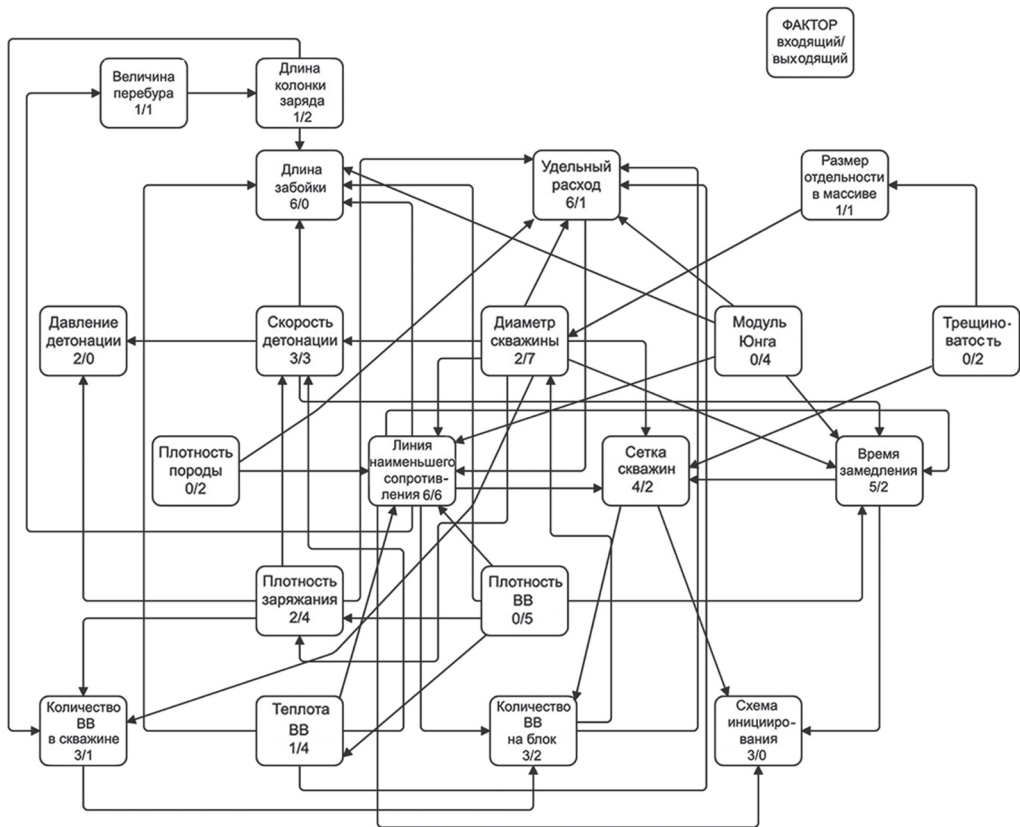


Рис. 2. Диаграмма взаимосвязи факторов, влияющих на дробление горных пород взрывными работами [составлено авторами]

Fig. 2. Diagram of interrelation of factors influencing rock crushing by blasting operations [compiled by the authors]

работах рассчитывался по следующему уравнению:

$$\frac{f_{\text{вход}} + f_{\text{выход}}}{f_{\text{вход}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $f_{\text{вход}}$ — количество входящих стрелок в фактор; $f_{\text{исход}}$ — количество исходящих стрелок из фактора; $f_{\text{общ}}$ — всего входящих и исходящих стрелок на диаграмме.

Результаты процентных вкладов представлены в табл. 2.

Согласно диаграмме, авторы выявили один из наиболее важных параметров при проектировании взрывных работ — линию наименьшего сопротивления.

В литературных источниках изложены методы и подходы к определению

ЛНС (табл. 3), учитывающие многообразие коэффициентов, входящих в них. На основании научного обзора можно выделить работы, в которых представлена связь между ЛНС и диаметром взрывной скважины [23–25] или комплексные уравнения, учитывающие трещиноватость горных пород [25–27], удельный расход и массу взрывчатого вещества [5, 23–25].

Обозначения в табл. 3: W — линия наименьшего сопротивления; d_3 — диаметр заряда, м; $d_{\text{СКВ}}$ — диаметр скважины, м; d — диаметр донной части взрывной скважины, мм; $\rho_{\text{ВВ}}$ — плотность заряда скважины (в скважине), г/см³; γ — плотность руды, т/м³; q_0 — удельный расход ВВ, кг/т; Q_3 — теплота взрыва

Таблица 2

Процентный вклад факторов в влияние на дробление горных пород взрывными работами [составлено авторами]**The percentage contribution of factors influencing the crushing of rocks by blasting operations [compiled by the authors]**

Фактор	Входит	Выходит	Вклад, %
Линия наименьшего сопротивления	6	6	12
Сетка скважин	4	2	6
Длина забойки	6	0	6
Количество ВВ на блок	3	2	5
Количество ВВ в скважине	3	1	4
Удельный расход ВВ	6	1	7
Интервал замедления	5	2	7
Длина колонки заряда	1	2	3
Схемы инициирования	3	0	3
Диаметр скважины	2	7	9
Величина перебура	1	1	2
Трещиноватость	0	2	2
Размер отдельности в массиве	1	1	2
Скорость детонации	3	3	6
Давление детонации	2	0	2
Плотность ВВ	0	5	5
Плотность заряжания	2	4	6
Теплота ВВ	1	4	5
Плотность породы	0	2	2
Модуль Юнга	0	4	4

эталонного ВВ (Аммонит 6ЖВ); $Q_{ВВ}$ – теплота взрыва применяемого ВВ; $Q_{э,2}$ – теплота взрыва эталонного ВВ (Граммонит 79/21); q – удельный расход ВВ, кг/м³; Δ – плотность заряжания, кг/м³; c – эталонная взрываемость породы, кг/м³; f – степень наклона скважины (1,0 – для вертикальных скважин, 0,95 – для скважин с наклоном 3:1); k_T – коэффициент трещинообразования (для монолитных пород – 1, для трещиноватых – 1,1, для сильнотрещиноватых – 1,2); m – коэффициент сближения скважин 0,7–1,5; K – сдерживающий фактор, равный (0,6 при $S < 4$ м², 0,7–0,8 при $S = 4–60$ м² и 0,9 при $S > 60$ м², где S – ширина блока); η – коэффициент

заполнения скважины ВВ; α – минимальный угол образующейся взрывной воронки; $R_{тр}$ – радиус зоны трещинообразования, м; $b_{отк}$ – размер зоны откола, м; b – коэффициент, учитывающий мощность применяемого ВВ; f – коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодряконова; k – коэффициент, характеризующий зажим скважин в донной части заряда, доли ед. ($k = 0,25N^2$, где N – число степеней свободы (открытых поверхностей) взрываемого объекта); A – полная идеальная работа взрыва ВВ, ккал/кг; n – показатель действия взрыва; $e, e_{эт}$ – объемная концентрация энергии эталонного и применяемого ВВ, ккал/см³; RQD – пока-

Таблица 3

Методы расчета ЛНС [составлено авторами]**LNS calculation methods/ Methods for calculating LNS [compiled by the authors]**

№	Источник	Формула расчета ЛНС	Учет структуры массива
1	[23] Ерофеев	$W = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \gamma \cdot Q_3}{4000 \cdot \rho \cdot Q_{BB} \cdot q_0}}$	косвенно, через расчет удельного расхода ВВ
2	[24] Ханукаев	$W = 28 \cdot d_3 \cdot \sqrt{\frac{Q_{BB} \cdot \rho_{ee}}{Q_{3-2} \cdot q}}$	косвенно, через расчет удельного расхода ВВ
3	[24] Копonenко	$W = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \rho_{BB}}{4000 \cdot q \cdot m}}$	косвенно, через расчет удельного расхода ВВ
4	[25]	$W = 47 \cdot k_T \cdot K_c \cdot d_3 \sqrt{\frac{\rho_{BB}}{e \cdot \gamma}}$	через коэффициент трещиноватости
5	[26]	$W = R_{mp} \cos(0,5\alpha)$	через расчет зоны трещинообразования
6	[27]	$W = R_{mp} + b_{omk}$	через расчет зоны трещинообразования и откола
7	[28]	$W = k \cdot \frac{90}{\sqrt{f}} \cdot d_3 \sqrt{\frac{e}{e_{3m} \cdot m}}$	через коэффициент k
8	[29]	$W = L \cdot \frac{d_3}{d_{ске}} \cdot \frac{5,93}{RQD} + 0,37 \left(\frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \rho_{BB}}{4000 \cdot q} \right)^{0,5}$	через показатель качества породы RQD
9	[5]	$W = d \sqrt{\frac{0,785 \Delta k_3}{mq}}$	косвенно, через расчет удельного расхода ВВ
10	[30]	$W = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{\rho s}{cfm}}$	не учитывает
11	[31]	$W = 53 \cdot k_T \cdot d_3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ee} Q_{3-2}}{\gamma \cdot Q_{BB}}}$	через коэффициент трещиноватости
12	[31]	$W = d_3 \cdot \sqrt{\frac{7,85 \rho_{ee} \eta}{1000 \cdot q \cdot m}}$	косвенно, через расчет удельного расхода ВВ

затель качества горных пород (степень трещиноватости горных пород), %.

Для корректного подбора ЛНС важно определить радиусы зон трещинообра-

зования скважинных зарядов и добыться перекрытия данных зон у соседних зарядов первого ряда скважин, а также перекрытия расстояния от заряда до сво-

бодной поверхности. Определение расстояния между зарядом взрывчатого вещества и свободной поверхностью — это не что иное, как согласование его мощности с прочностью горного массива, который необходимо разрушить. В данном исследовании для всех расчетов принималась неограниченная свободная поверхность и радиус воронки взрыва, равный 90° .

Если нет перекрытия зон трещинообразования (рис. 3) между двумя соседними скважинами, некоторая часть породы между ними останется нетронутой.

Определив границы зон трещинообразования и, следовательно, перекрытие, можно определить зоны потенциальной непроработки массива и внести необходимые коррективы в параметры конструкции заряда, чтобы избежать этого. Чтобы определить зоны трещинообразования, используется следующая последовательность вычислительных операций [32 – 34]:

1. Определим линейную плотность ВВ по следующей формуле:

$$q_e = \frac{\rho \pi d^2}{4 \cdot 10}, \text{ кг/м,} \quad (2)$$

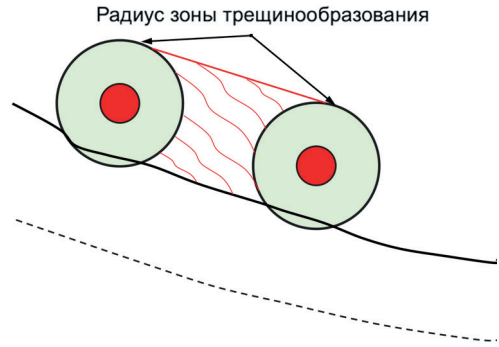
где ρ — плотность взрывчатого вещества, г/см³; d — диаметр скважины, см.

2. Определим радиус зоны трещинообразования:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{exp}}}{\rho \cdot c^2} \cdot 6,62 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{q_e}} \right)^{-1,2}, \quad (3)$$

где E_{exp} — концентрация энергии взрыва в заряде, Дж/м³; ρ — плотность материала, кг/м³; c — скорость упругой продольной волны в материале, м/с; R — радиус зоны трещинообразования, м; q_e — линейная плотность взрывчатого вещества, кг/м; ε — деформация взрывной волны.

Связь между напряжением (σ) и деформациями (ε) определяется как



Красные круги схематично отражают устья скважин, черные круги с зеленой заливкой отражают радиусы зон трещинообразования скважин

Рис. 3. Потенциальная зона непроработки массива (отмечена красными кривыми) [составлено авторами]

Fig. 3. Potential undeveloped zone of the massive (marked with red curves) [compiled by the authors]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

где σ , ε , E — напряжение, деформация и модуль Юнга соответственно.

Уравнение (4) можно записать как

$$\sigma = \frac{E_{\text{exp}}}{\rho \cdot c^2} \cdot 6,62 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{q_e}} \right)^{-1,2} \cdot E, \quad (5)$$

где E — модуль Юнга, кг/м²; σ — напряжение, кг/м²; ρ — плотность породы, кг/м³.

Отсюда радиус зоны трещинообразования

$$R = \frac{\sqrt{q_e}}{\sqrt[1,2]{\frac{\sigma \cdot \rho \cdot c^2 \cdot 10^3}{E_{\text{exp}} \cdot E \cdot 6,62}}}. \quad (6)$$

Чтобы оценить радиус зоны трещинообразования R из уравнения (6), важно знать критическое напряжение — σ , необходимое для разрушения горной массы.

Основная часть горной породы при взрыве разрушается при растяжении (ε), когда отраженная ударная волна превышает деформацию (ε_0), соответствующую пределу прочности ГП.

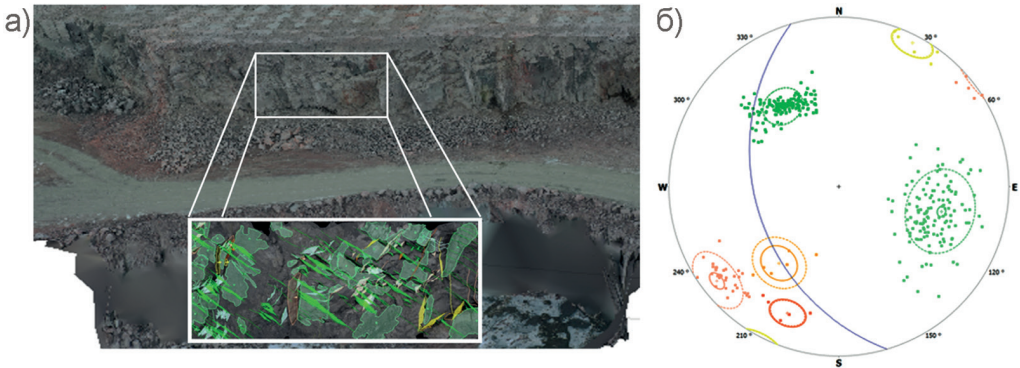


Рис. 4. Пример картирования откосов уступа: выделение кластеров трещин (а); полярная диаграмма трещиноватости (б) [1]

Fig. 4. Example of ledge slope mapping: identification of clusters of fractures (a); polar diagram of fractures (b)[1]

Кук (1971) указал, что когда средняя деформация (ε) отраженной волны превышает предельную деформацию растяжения (ε_0) на коэффициент K , то происходит разрушение горной породы.

То есть когда

$$\varepsilon = K \cdot \varepsilon_0. \quad (7)$$

Кук (1971) также обнаружил, что значения K обычно лежат в пределах от 1,4 до 1,6.

Также необходимо рассчитывать радиусы зон трещинообразования для всех

типов пород, слагающих откос, поэтому одна и та же скважина может иметь несколько радиусов зон трещинообразования в зависимости от того, в каких породах она была пробурена. Оперативная оценка пород, слагающих откос, проводилась авторами при помощи беспилотных летательных аппаратов и далее обрабатывалась в специализированных ПО (рис. 4).

После того, как были рассчитаны радиусы зон трещинообразования заряда взрывчатого вещества, были построены

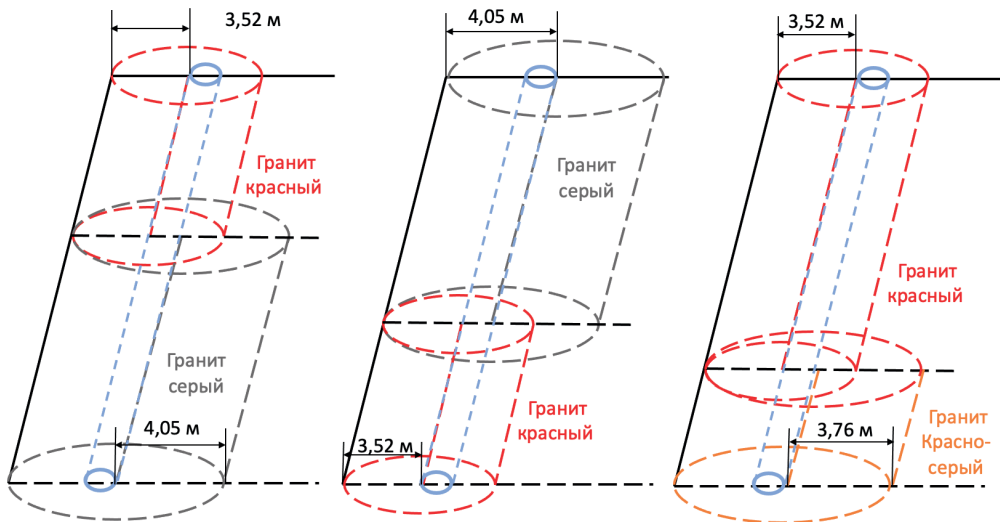


Рис. 5. Зоны трещинообразования [составлено авторами]

Fig. 5. Crack formation zones [compiled by the authors]

цилиндры трещинообразования, соответствующие типам гранитов (рис. 5).

Результаты

Так как массив, подлежащий взрыву, сложен более чем одним типом пород, представляется необходимым разработать математическую модель, учитывающую высоту каждого типа породы при выборе нагрузки, которую необходимо приложить к массиву для его разрушения. Таким образом, введем уравнение для определения итоговой линии наименьшего сопротивления (W), необходимой для разрушения сложноструктурного массива:

$$W = \sum_{i=1}^n \left[L_i > \frac{\sum_{j=1}^n (L_j - l_{заб})}{n} \right] \cdot W_i, \quad (8)$$

где W — итоговая линия наименьшего сопротивления скважинного заряда, при которой массив будет разрушен; n — общее количество типов пород; L_i — суммарная высота i -й горной породы или длина скважины, м; $L_{заб}$ — длина забойки, м; W_i — ЛНС для разрушения массива, сложенного породами i .

Выражение

$$\left[L_i > \frac{\sum_{j=1}^n (L_j - l_{заб})}{n} \right]$$

равно 1, если условие

$$\left[L_i > \frac{\sum_{j=1}^n (L_j - l_{заб})}{n} \right]$$

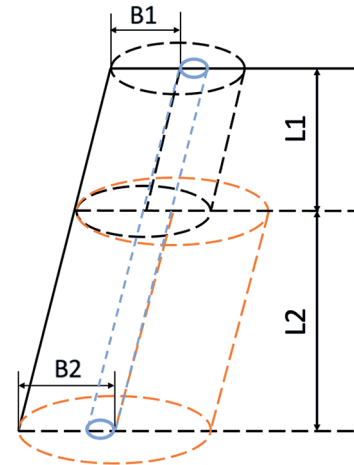
выполняется.

Таким образом, если условие

$$L_2 > (L_1 + L_2 - l_{заб}) \cdot 50\%,$$

то в данном уравнении выбирается ЛНС — W_2 (рис. 6).

Эта формула представляет собой математическую модель, которая может быть использована для описания распределения нагрузки в зависимости от



$B1-B2$ — зона трещинообразования для пород, имеющих разные физико-механические свойства

Рис. 6. Распределение нагрузки по высоте заряда BB : [составлено авторами]

Fig. 6. Load according to explosive charge height [compiled by the authors]

высоты пород, слагающих массив, подлежащий взрыву.

Для оценки предлагаемой методики использованы уравнения (9) — (12) для получения кривой распределения granulometric composition [35 — 37] и получены две кривые: зеленая кривая — после оптимизации, синяя кривая — до оптимизации (рис. 7).

Адаптированные уравнения Кузнецова:

$$x_c = A \cdot q_0^{-0,8} \cdot Q^{1/6} \cdot \left(\frac{RWS}{115} \right)^{19/20}, \quad (9)$$

где x_c — средний размер частиц, см; A — коэффициент горной породы, варьируется от 0,8 до 22, в зависимости от твердости и структуры — это критический параметр, и его вычисление дано в уравнении (10); q_0 — удельный расход BB , кг на 1 м^3 породы; Q — масса взрывчатого вещества в скважине, кг; RWS — весовая прочность по отношению к $ANFO$, 115 — это RWS тротила.

Всегда трудно оценить реальное влияние геологии, но следующая процедура

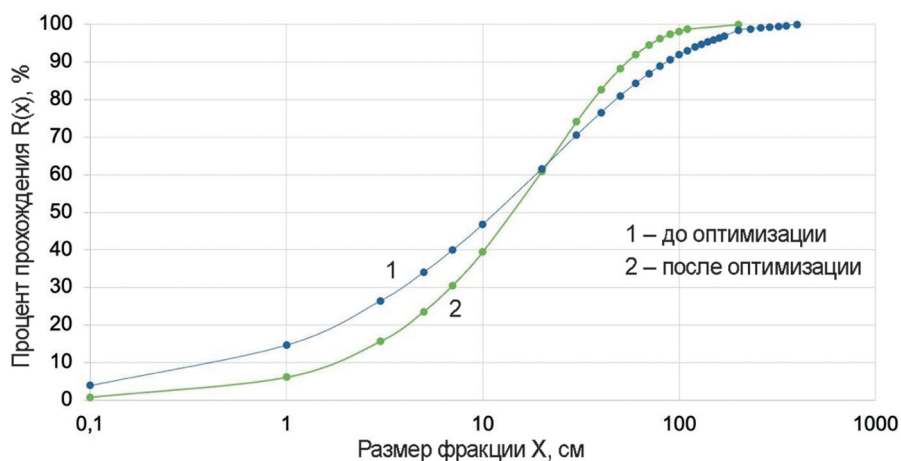


Рис. 7. Анализ распределения гранулометрического состава [составлено авторами]
 Fig. 7. Analysis of the distribution of the granulometric composition [compiled by the authors]

решает некоторые из основных проблем при получении коэффициента отдельной породы A , определяемого как

$$A = 0,06(RMD + RDI + HF) \cdot C(A), \quad (10)$$

где RMD – описание горной массы (рыхлая порода = 10, массивное образование (трещины дальше друг от друга, чем взрывная скважина) = 50); RDI – влияние плотности; HF – коэффициент твердости (если $Y < 50$, $HF = Y/3$, если $Y > 50$, $HF = UCS/5$, Y – модуль упругости, ГПа; UCS – предел прочности при сжатии, МПа); $C(A)$ – поправочный коэффициент, обычно в пределах 0,5 – 2.

Уравнение Розина–Раммлера:

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c} \right)^n \right], \quad (11)$$

где y – совокупный процент прохождения; x – размер частицы; x_c – средне-взвешенный размер куска взорванной горной массы (63,2% на кумулятивной кривой); n – индекс однородности, обычно от 0,7 до 2.

Уравнение индекса однородности выглядит следующим образом:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{d} \right) \cdot \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \left(\frac{\text{abs}(CCL - BCL)}{L_t} + 0,1 \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{L_t}{H} \right) \quad (12)$$

где B – ЛНС, м; S – расстояние между скважинами, м; d – диаметр скважины, мм; W – стандартное отклонение точности бурения, м; L_t – общая длина заряда ($BCL + CCL$), м; BCL – длина заряда в перебуре, м; CCL – длина колонки заряда без перебура, м; H – высота уступа, м.

Предложенный подход к учету ЛНС по формуле (8) в приведенной методике для получения кривой распределения гранулометрического состава позволяет достичь уменьшения процентного выхода некондиционных фракций в 4 раза. После оптимизации параметров по зеленой кривой распределения выход негабарита составляет 1,85%, а до оптимизации – 8,08%.

Использование методики, адаптированной к структурным особенностям массива, предполагает повышение каче-

ства ведения взрывных работ по сравнению со стандартными подходами, обеспечивая более эффективное разрушение горной массы и снижение выхода негабаритных фракций.

Выводы

1. В исследовании определены причинно-следственные связи между различными факторами (в количестве двадцати), оказывающими влияние на фрагментацию породы в результате взрывных работ, наиболее значимым из которых является линия наименьшего сопротивления.

2. Структурные особенности взрываемого массива входят в расчетные формулы определения линии наименьшего

сопротивления через коэффициент трещиноватости, удельный расход ВВ, показатель качества породы RQD , либо не учитываются совсем.

3. Предложена математическая модель для расчета линии наименьшего сопротивления, позволяющая описывать распределение нагрузки в зависимости от высоты породных сложноструктурных массивов, подлежащих взрыву.

4. Показатель выхода доли негабаритной фракции можно сократить, используя предложенную методику, учитывающую структурные особенности взрываемого массива. Данная методика требует верификации проведением промышленных взрывов, что послужит продолжением исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишейский В. А., Рядинский Д. Э., Магомедов Г. С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываемого массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 79–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.

2. Аленичев И. А., Рахманов Р. А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 334–341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

3. *Ochilov Sh. A., Makhmudov D. R., Nizamova A. T., Norinov S. S., Umirzokov A. A.* Methods for calculating the parameters of drilling and blasting operations based on the primary determination of the zones of destruction of the rock mass // E3S Web of Conferences. 2024, vol. 491, article 02014. DOI: 10.1051/e3sconf/202449102014.

4. Кочанов А. Н., Одинцов В. Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. — 2016. — № 6. — С. 38–48.

5. Кабетенов Т., Юсупов Х. А., Рустемов С. Т. Определение рациональных параметров скважинной отбойки с учетом времени действия взрывного импульса // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 2. — С. 75–81.

6. Егоров В. В., Волокитин А. Н., Угольников Н. В., Соколовский А. В. Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость // Горная промышленность. — 2021. — № 3. — С. 110–115. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.

7. Цирель С. В., Павлович А. А., Мельников Н. Я. Обоснование параметров бортов карьеров при крутопадающем залегании слоев // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 49–54. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.07.

8. Маринин М. А., Евграфов М. В., Должиков В. В. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill»: современное состояние и перспективы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 7. — С. 65–74. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3264.

9. Насиров У. Ф., Заиров Ш. Ш., Мехмонов М. Р., Фатхиддинов А. У. Управление параметрами энергии взрыва для обеспечения интенсивного дробления горных пород на карьерах // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 2. — С. 137–149. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-137-149.

10. *Chenxi D., Renshu Y., Chun F.* Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2021, vol. 138, pp. 104 – 122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104622.

11. *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.

12. *Hashemi A., Katsabanis P.* The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-induced rock damage and fragmentation // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, vol. 53, pp. 2327 – 2346. DOI: 10.1007/s00603-019-02043-9.

13. *Dehghani H., Babanouri N., Alimohammadnia F., Kalhori M.* Blast-induced rock fragmentation in wet holes // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 743 – 752. DOI: 10.1007/s42461-019-00163-y.

14. *Демидюк Г. П.* Регулирование действия взрыва при отбойке твердых горных пород // Взрывное дело. – 1974. – № 73/30. – С. 210 – 224.

15. *Panasjuk A., Davydova I., Shlapak V., Levytskyi V.* Research of borehole drilling parameters for determining the optimum size of granite stone blocks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023, vol. 1254, article 012060. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012060.

16. *Kong D., Saroglou C., Wu F., Sha P., Li B.* Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 141, article 104729. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104729.

17. *Buyer A., Aichinger S., Schubert W.* Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization // Engineering Geology. 2020, vol. 264, article 105332. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105332.

18. *Adjiski V., Panov Z., Popovski R., Stefanovska R.* Application of photogrammetry for determination of volumetric joint count as a measure for improved rock quality designation (RQD) index // Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal. 2021, vol. 2, no. 1, pp. 12 – 20. DOI: 10.5281/zenodo.5594940.

19. *Kovalevich S. V., Zyryanov I. V., Chernobyl V. I.* Experience of drilling-and-blasting in diamond fields in Yakutia // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 6, pp. 953 – 966. DOI: 10.1134/S1062739122060102.

20. *Менжулин М. Г., Хорева А. Ю., Афанасьев П. И., Тюлькин С. А.* Определение параметров буровзрывных работ при отработке Гавриловского месторождения гранитов // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 42 – 46. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.08.

21. *Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., Levashova E. V., Rogova I. V.* Th-rich zircon from a pegmatite vein hosted in the Wiborg Rapakivi granite massif // Geosciences. 2023, vol. 13, no. 12, article 362. DOI: 10.3390/geosciences13120362.

22. *Ковалевский В. Н., Мысин А. В.* Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 20 – 34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_20.

23. *Ерофеев И. Е.* Повышение эффективности буровзрывных работ на рудниках. – М.: Недра, 1988. – С. 46 – 54.

24. *Ханукаев А. Н.* Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 222 с.

25. *Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I.* Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives // Mining of Mineral Deposits. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 22 – 30. DOI: 10.33271/mining13.03.022.

26. *Вохмин С. А., Курчин Г. С., Кирсанов А. К., Дерягин П. А.* Методика расчета параметров буровзрывных работ при проходке горизонтальных и наклонных горных выработок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 4(48). – С. 5 – 9.

27. *Боровиков В. А., Ванягин И. Ф.* К расчету параметров волн напряжений при взрыве удлиненного заряда в горных породах // Взрывное дело. – 1976. – № 76/33. – С. 39 – 43.

28. *Легостаев Е. Г.* Исследование влияния объемной концентрации энергии заряда ВВ на эффективность прямых врубов в крепких породах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Ин-т горного дела им. А. А. Сочинского, 1967. – 22 с.

29. *Roy P. P.* Rock blasting: effects and operations. CRC Press, 2005, pp. 1 – 37.

30. Zhang P., Duan J., Wang M., Guo J. Research and application of chassis resistance line of rock breaking mechanism // *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2019, vol. 2, no. 3, pp. 98 – 107. DOI: 10.25236/AJETS.020060.

31. Возгрин Р. А. Повышение качества дробления горной массы при применении скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ уменьшенного диаметра: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 21 с.

32. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // *Записки Горного института*. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245.

33. Torbica S., Lapcevic V. Rock breakage by explosives // *European International Journal of Science and Technology*. 2014, vol. 3, no. 2, pp. 96 – 104.

34. Хохлов С. В., Виноградов Ю. И., Маккоев В. А., Абиев З. А. Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве // *Горные науки и технологии*. — 2024. — № 9–2. — С. 85–96. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-11-177.

35. 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.

36. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing. A review // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023, vol. 56, pp. 747 – 778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.

37. Mutinda E. K., Alunda B. O., Maina D. K., Kasomo R. M. Prediction of rock fragmentation using the Kuznetsov – Cunningham – Ouchterlony model // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021, vol. 121, no. 3, pp. 107 – 112. DOI: 10.17159/2411-9717/1401/2021. **MIAB**

REFERENCES

1. Isheisky V. A., Ryadinskii D. E., Magomedov G. S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass based on accounting for structural features of massif in the blast design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 79 – 95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.

2. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334 – 341. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

3. Ochilov Sh. A., Makhmudov D. R., Nizamova A. T., Norinov S. S., Umirzokov A. A. Methods for calculating the parameters of drilling and blasting operations based on the primary determination of the zones of destruction of the rock mass. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 491, article 02014. DOI: 10.1051/e3sconf/202449102014.

4. Kochanov A. N., Odintsev V. N. Wave pre-destruction of solid rocks under blasting. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no. 6, pp. 38 – 48. [In Russ].

5. Kabetenov T., Yusupov K. A., Rustemov S. T. Rational parameters of blasting, considering action time of explosion-generated pulse. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no. 2, pp. 75 – 81. [In Russ].

6. Egorov V. V., Volokitin A. N., Ugolnikov N. V., Sokolovsky A. V. Justification of parameters and technology of drilling and blasting operations to ensure the required lumpiness. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 110 – 115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.

7. Tsirel S. V., Pavlovich A. A., Melnikov N. Ya. Substantiation of pitwall parameters in rock mass with steeply dipping bedding. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 49 – 54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.07.

8. Marinin M. A., Evgrafov M. V., Dolzhikov V. V. Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the concept of “mine-to-mill”: current state and prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 7, pp. 65 – 74. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3264.

9. Nasirov U. F., Zairov Sh. Sh., Mekhmonov M. R., Fatkhiddinov A. U. Controlling blast energy parameters to ensure intensive open-pit rock fragmentation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 137 – 149. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-137-149.

10. Chenxi D., Renshu Y., Chun F. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2021, vol. 138, pp. 104–122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104622.
11. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation 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.
12. Hashemi A., Katsabanis P. The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-induced rock damage and fragmentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 2327–2346. DOI: 10.1007/s00603-019-02043-9.
13. Dehghani H., Babanouri N., Alimohammadnia F., Kalhori M. Blast-induced rock fragmentation in wet holes. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 743–752. DOI: 10.1007/s42461-019-00163-y.
14. Demidyuk G. P. Regulation of blast action during hard rock jackhammering. *Explosion technology*. 1974, no. 73/30, pp. 210–224. [In Russ].
15. Panasiuk A., Davydova I., Shlapak V., Levytskyi V. Research of borehole drilling parameters for determining the optimum size of granite stone blocks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023, vol. 1254, article 012060. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012060.
16. Kong D., Saroglou C., Wu F., Sha P., Li B. Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 141, article 104729. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104729.
17. Buyer A., Aichinger S., Schubert W. Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization. *Engineering Geology*. 2020, vol. 264, article 105332. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105332.
18. Adjiski V., Panov Z., Popovski R., Stefanovska R. Application of photogrammetry for determination of volumetric joint count as a measure for improved rock quality designation (RQD) index. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal*. 2021, vol. 2, no. 1, pp. 12–20. DOI: 10.5281/zenodo.5594940.
19. Kovalevich S. V., Zyryanov I. V., Chernobyl V. I. Experience of drilling-and-blasting in diamond fields in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, no. 6, pp. 953–966. DOI: 10.1134/S1062739122060102.
20. Menzhulin M. G., Khoreva A. Yu., Afanasiev P. I., Tyulkin S. A. Drilling and blasting parameters for Gavrilovo granite deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 42–46. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.08.
21. Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., Levashova E. V., Rogova I. V. Th-rich zircon from a pegmatite vein hosted in the Wiborg Rapakivi granite massif. *Geosciences*. 2023, vol. 13, no. 12, article 362. DOI: 10.3390/geosciences13120362.
22. Kovalevsky V. N., Mysyn A. V. Performance of tubular elastic charges in natural stone production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 20–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_20.
23. Erofeev I. E. *Povyshenie effektivnosti burovzryvnykh rabot na rudnikakh* [Increasing the efficiency of drill-and-blast operations in mines], Moscow, Nedra, 1988, pp. 46–54.
24. Khanukaev A. N. *Fizicheskie protsessy pri otboyye gornykh porod vzryvom* [Physical processes in the breaking of rocks by explosion], Moscow, Nedra, 1974, 222 p.
25. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 22–30. DOI: 10.33271/mining13.03.022.
26. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Deryagin P. A. Calculation of parameters of drilling and blasting operations for horizontal and incline working. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014, no. 4(48), pp. 5–9. [In Russ].
27. Borovikov V. A., Vanyagin I. F. On calculation of stress wave parameters upon explosion of elongated charge in rocks. *Explosion technology*. 1976, no. 76/33, pp. 39–43. [In Russ].
28. Legostaev E. G. *Issledovanie vliyaniya ob'emnoy kontsentratsii energii zaryada VV na effektivnost' pryamykh vrubov v krepkikh porodakh* [Investigation of the influence of the volumetric concentration of the explosive charge energy on the efficiency of direct cuttings in strong rocks], Candidate's thesis, Moscow, 1967, 22 p.
29. Roy P. P. *Rock blasting: effects and operations*. CRC Press, 2005, pp. 1–37.

30. Zhang P., Duan J., Wang M., Guo J. Research and application of chassis resistance line of rock breaking mechanism. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2019, vol. 2, no. 3, pp. 98–107. DOI: 10.25236/AJETS.020060.

31. Vozgrin R. A. *Povyshenie kachestva drobileniya gornoy massy pri primenenii skvazhinnykh zaryadov emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv umen'shennogo diametra* [Improving the quality of crushing rock mass in the application of borehole charges emulsion explosives of reduced diameter], Candidate's thesis, Moscow, 2015, 21 p.

32. Vinogradov Y. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Y. I. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 231–245. [In Russ].

33. Torbica S., Lapcevic V. Rock breakage by explosives. *European International Journal of Science and Technology*. 2014, vol. 3, no. 2, pp. 96–104.

34. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Makkoev V. A., Abiyev Z. A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9–2, pp. 85–96. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-11-177.

35. 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_91_0_96.

36. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing. A review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023, vol. 56, pp. 747–778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.

37. Mutinda E. K., Alunda B. O., Maina D. K., Kasomo R. M. Prediction of rock fragmentation using the Kuznetsov–Cunningham–Ouchterlony model. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021, vol. 121, no. 3, pp. 107–112. DOI: 10.17159/2411-9717/1401/2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишейский Валентин Александрович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1007-6562,

Рядинский Даниил Эдуардович¹ — аспирант,

e-mail: riadinskii.d@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5765-1811,

Магомедов Гаджи Сиражудинович — генеральный директор,

АО «Гавриловское карьероуправление», e-mail: aogku@yandex.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Ишейский В.А., e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. *Isheyskiy*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1007-6562,

D.E. *Ryadinskiy*¹, Graduate Student,

e-mail: riadinskii.d@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5765-1811,

G.S. *Magomedov*, General Director,

JSC «Gavrilovskoye Quarry Administration»,

188870, Gavrilovo, Russia, e-mail: aogku@yandex.ru,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.A. *Isheyskiy*, Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 02.09.2024; получена после рецензии 16.12.2024; принята к печати 10.02.2025.

Received by the editors 02.09.2024; received after the review 16.12.2024; accepted for printing 10.02.2025.