

Методологические основы адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений

В.Л. Яковлев, С.Н. Жариков, А.С. Реготунов, В.А. Кутуев✉

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ 9634447996@mail.ru

Резюме: Статья посвящена вопросам совершенствования проектирования и реализации технологических взрывов сложноструктурных массивов при разработке твердых полезных ископаемых открытым способом. Представлены этапы адаптации технологии буровзрывных работ в новых условиях ведения горных пород на карьерах Уральского региона, Сибири, Карелии и Казахстана. Показана систематизация основных факторов, определяющих условия изменения параметров буровзрывных работ на основе данных о физико-механических характеристиках горных пород в естественном залегании. В статье показаны переходные процессы в классифицированном виде, на основе которых развиты методологические основы адаптации техники и технологии буровзрывных работ к переменным условиям освоения сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых. Методический подход основан на установленных конкретных экспериментальных данных: неоднородности горного массива по трещиноватости по данным шарошечного бурения; взаимосвязи скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ с плотностью и диаметром заряда взрывчатых веществ в разных его диапазонах; влиянии степени затухания сейсмозврывных колебаний на скорость смещения охраняемых участков бортов карьера при различном направлении инициирования зарядов взрывчатых веществ.

Ключевые слова: адаптация буровзрывных работ, освоение полезных ископаемых, дезинтеграция горных пород, переходные процессы, районирование по показателям прочностных свойств пород, геометризация карьерного поля по трещиноватости, сейсмическое воздействие взрывов

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хоздоговорных средств.

Для цитирования: Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Методологические основы адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений. *Горная промышленность*. 2024;(6):89–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97>

Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to changing mining and geological conditions when mining complex-structured deposits

V.L. Yakovlev, S.N. Zharikov, A.S. Regotunov, V.A. Kutuev✉

Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ 9634447996@mail.ru

Abstract: The article addresses the issues of improving the design and implementation of process blasts of complex-structured rock masses in open-pit mining of solid minerals. The stages of adaptation are presented for the drilling and blasting technology in the new mining conditions in open pits of the Ural region, Siberia, Karelia and Kazakhstan. Systematization of the main factors that define the conditions for changing the drilling and blasting parameters is shown based on the data on in-situ physical and mechanical characteristics of rocks. The article shows transient processes in the classified form, which are used as the basis for the development of fundamental methodological principles for adapting the equipment and technology of drilling and blasting operations to the variable conditions of mining complex-structural deposits of solid minerals. A methodological approach is

based on the established specific experimental data: the heterogeneity of the rock mass in terms of fracturing according to the roller-bit drilling data; the relationship between the detonation rate of emulsion explosives and the density and diameter of the explosive charge in its different ranges, the influence of the degree of attenuation of seismic blasting oscillations on the rate of displacement of the protected sections of the open pit walls at different directions of the explosive charge priming.

Keywords: adaptation of drilling and blasting operations, mineral development, disintegration of rocks, transient processes, zoning by indicators of rock strength properties, geometrization of the open pit field by fracturing, seismic impact of blasts

Acknowledgments: The research was performed within the framework of the State Contract No.075-00412-22 PR, Topic 1 (2022-2024): Methodological Basis for a Strategy of Integrated Development of Solid Mineral Reserves along with the Evolution of Mining Systems (FUWE-2022-0005), reg. No. 1021062010531-8-1.5.1, as well as with the use of additional funds from business contracts.

For citation: Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to changing mining and geological conditions when mining complex-structured deposits. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):89–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97>

Введение

Горнодобывающий и металлургический комплексы были и остаются базовой отраслью России, определяющей уровень ее международного авторитета, политического и финансового благополучия страны. Более 65% железной руды, цветных металлов, алмазов в стране в ближайшие годы будет добываться из крупных сложноструктурных месторождений.

Большинство месторождений твердых полезных ископаемых разрабатывают с помощью технологии буровзрывных работ (БВР). Доля затрат на БВР в себестоимости добычи тонны полезного ископаемого составляет до 35%.

Проектирование разрушения горных пород взрывом осуществляется согласно ФНИП¹.

Влияющими на выбор подходов к разрушению массива горных пород факторами являются: физико-механические свойства горных пород; трещиноватость массива; однородность и перемежаемость в пределах взрываемого блока; степень обводненности пород; технологические требования.

Ранее предложенные способы оценки физико-механических и структурных свойств, существующие классификации [1–3] для целей разрушения отражают лишь укрупнённо объект. Как правило, имеющаяся информация о массиве имеет недостаточную детальность и не дает представления о динамике изменения горно-геологических условий по глубине разработки месторождения, учитывая и влияние на них массовых взрывов, которые производят подвижки в иерархически блочной структуре массива горных пород. Вследствие этого возникает неопределенность, как и насколько возможно изменить параметры разрушения последующих локальных массивов горных пород. Тут следует отметить, что однородных массивов не бывает в принципе, но почему-то методически все расчёты подгоняются под массив, который считается квазиоднородным. Это затрудняет оперативное реагирование на изменение параметров разрушающей нагрузки ввиду изменившихся условий применения. На технологических блоках, сложенных породами различной трещиноватости и крепости, результат взрыва при учете обобщенной информации

о свойствах массива будет труднопредсказуем. Анализ отечественной [4–6] и зарубежной [7; 8] практики ведения буровзрывных работ показывает необходимость маневрирования техническими параметрами БВР в пределах не только одного месторождения, но и выемочного блока, в зависимости от установленных структурных особенностей и прочности горных пород. В этой связи появляются особые требования к учету изменяющихся горно-геологических условий, влияющих на качество подготовки горного массива к выемке буровзрывным способом, и промышленной безопасности горных работ. Это указывает на необходимость разработки поэтапного установления технических решений, технологических приемов для разрушения массивов с рациональными энергетическими затратами энергии взрыва, соответствующих сложившимся условиям добычи полезных ископаемых.

Современное состояние буровзрывной технологии характеризуется наличием большого разнообразия технических средств управления энергией взрыва [9–13] и энергоэффективностью буровой машины [14–17]. Их своевременное и уместное применение может обеспечить существенное сокращение затрат на буровзрывной передел. Если наоборот, то необоснованный выбор может привести к снижению качества взорванной горной массы и производительности буровой техники. Поэтому для адаптации БВР требуется наличие информации о показателях процесса бурения взрывных скважин, физико-механических характеристиках и особенностях структуры массива горных пород, включая и техногенную нарушенность от предыдущих взрывов, для обоснования рациональных вариантов разрушающей нагрузки (за счет изменения массы и типа ВВ, формы и параметров расположения зарядов в массиве, порядка и схем инициирования, сетки скважин, плотности заряжания и регулирования мощности инициатора). Каждое месторождение полезного ископаемого обладает неповторимым сочетанием свойств. Эти свойства необходимо системно учитывать для подбора наиболее рациональных способов подготовки массивов горных пород к буровзрывной отбойке. Объективно существует необходимость и есть возможность создания общего порядка комплексной многофакторной адаптации параметров технологии БВР к изменяющимся условиям.

Таким образом, необходима разработка комплексного подхода, с одной стороны, для уточнения физико-механических и структурных свойств пород, слагающих массив, а с другой – управления для поэтапного регулирования взрывной нагрузки.

¹ Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: в редакции Приказа Ростехнадзора от 08.12.2020 №505. (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 04.02.2024); Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения: в редакции Приказа Ростехнадзора от 03.12.2020 №494. (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности). Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (дата обращения: 04.02.2024).

Состояние исследований по теме

В лаборатории Разрушения горных пород ИГД УрО РАН накоплены практические и теоретические результаты, полученные при разработке и внедрении технико-технологических приемов управления энергией при бурении и взрывном разрушении в различных условиях ведения горных пород. Результаты исследований позволили обосновать направления совершенствования БВР на крупных карьерах Урала, Сибири, Казахстана. Наиболее значимыми признаны технические мероприятия, связанные с получением оперативных данных о состоянии горных пород в естественном залегании, обеспечивающем изменение средств инициирования, схем коммутации, конструкции зарядов, а также рецептуры взрывчатых веществ. Указанные приемы адаптации влияют на выбор способа и режима бурения, конструкции станка и бурового инструмента [18]. Научное решение обозначенных задач стало возможно с помощью нового методологического подхода [19; 20], обеспечивающего выявление и исследование переходных процессов, возникающих при переводе массива горных пород из состояния в целом в состояние взорванной горной массы. На основе изучения влияния различных факторов произведена классификация переходных процессов [20], продолжительности их развития и установлены направления совершенствования технологии БВР. Предлагаемая классификация включает операции технологического цикла БВР, физическую сущность переходных процессов и факторы, определяющие параметры операций. Исследование этой совокупности позволяет определить сроки переходного процесса, в течение которых необходимо заранее найти ресурсы для компенсации нежелательных явлений.

Анализ ретроспективных данных технологического развития БВР на крупных карьерах Урала, Сибири, Казахстана позволил сделать вывод, что управляемая реализация адаптации параметров БВР зависит от факторов, в наибольшей степени препятствующих началу принятия нововведений. Исследование переходных процессов продолжают, пока все препятствующие факторы не будут установлены.

Систематизированы основные факторы, определяющие изменение условий подготовки горной массы к выемке буровзрывным способом. Позже систематизация была дополнена способами экспресс-получения информации о физико-механических характеристиках горных пород, поскольку чем большая детальность при рассмотрении свойств будет учтена, тем более высокой степени адаптации параметров БВР можно достигнуть [21].

Рассмотрение переходных процессов при освоении месторождений твердых полезных ископаемых обеспечивает необходимые и достаточные условия поиска критериев оценки эффективности операций БВР и совершенствование организации управления горными работами. Это открывает ряд возможностей практического характера. Исследование переходных процессов в части буровзрывных работ на текущий момент позволило [19; 20]: сформулировать требования к специальной буровой технике; разработать методику обоснования производительности смесительно-зарядных машин; создать методику оперативного определения скорости детонации эмульсионных ВВ и коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова, формализовать взаимосвязи между взрывным разрушением и выемочными работами, предложить новый способ уступной взрывной отбойки с применением горизонтальных скважин в нижней части уступа. Дальнейшее

развитие методики уточнения прочностных свойств горных пород при шарошечном способе проходки скважин должно быть нацелено на повышение уровня интерпретации получаемой информации и выявление на этой основе структурных особенностей залегания массива горных пород с последующим оперативным учетом этой информации при формировании скважинных зарядов ВВ.

Надо полагать, что в смежных технологических процессах – экскавации и транспортировании, также существуют специфические переходные процессы, которые следует отдельно изучать в целях разработки рациональных приемов адаптации параметров указанных технологий.

Методологические положения адаптации технологии БВР к новым условиям

Последовательность адаптации БВР, зависящая от получаемой во времени информации о свойствах массива горных пород, представлена на рис. 1.

Реализация комплексной методики заключается в последовательном выполнении работ, которые объединены в три группы (три этапа комплексной методики).

На первом этапе [22] для опытного технологического блока осуществляется выкопировка этого участка с погоризонтного маркшейдерского плана, на которой обозначаются границы пород, различающихся по буримости и взрываемости, и указывается категория трещиноватости.

Затем осуществляются маркшейдерская и геологическая съемка (предварительный проект на бурение), обследование структуры массива горных пород подготавливаемого к взрыву блока [23; 24] (определение генетического типа, геометрических и морфологических параметров) (карта трещиноватости).

Карта трещиноватости подготавливаемого к взрыву блока сопоставляется с предварительным проектом на бурение. Итогом сопоставления является скорректированный проект на бурение.

Далее производят вынос в натуру проектных точек расположения взрывных скважин из *скорректированного проекта на бурение*.

На втором этапе в процессе бурения скважин производится запись специальным устройством информации о параметрах шарошечного бурения [25]. Полученные значения скорости бурения используют как косвенный показатель для модельного отображения горных пород по прочности по каждому ряду скважин. На основе установленного факта (на примере серпентинитов Баженковского месторождения хризотил-асбеста) взаимосвязи неоднородности горного массива по трещиноватости и среднего значения скорости шарошечного бурения устанавливают участки с различной категорией трещиноватости и фиксируют их на модели.

Полученную модель с указанными на ней участками возможной неоднородности сопоставляют с геолого-маркшейдерской документацией подготавливаемого к взрыву блока. Итогом сопоставлений являются модели прочностных свойств горных пород по каждому ряду скважин в блоке (рис. 2), дополненные данными о зонах действительного проявления неоднородности и информацией о преобладающих категориях трещиноватости блока.

На третьем этапе по результатам исполнительной съемки сети пробуренных скважин производится разработка и утверждение финального варианта проекта на массовый взрыв с учетом полученной новой информации о горно-геологических условиях ведения БВР.

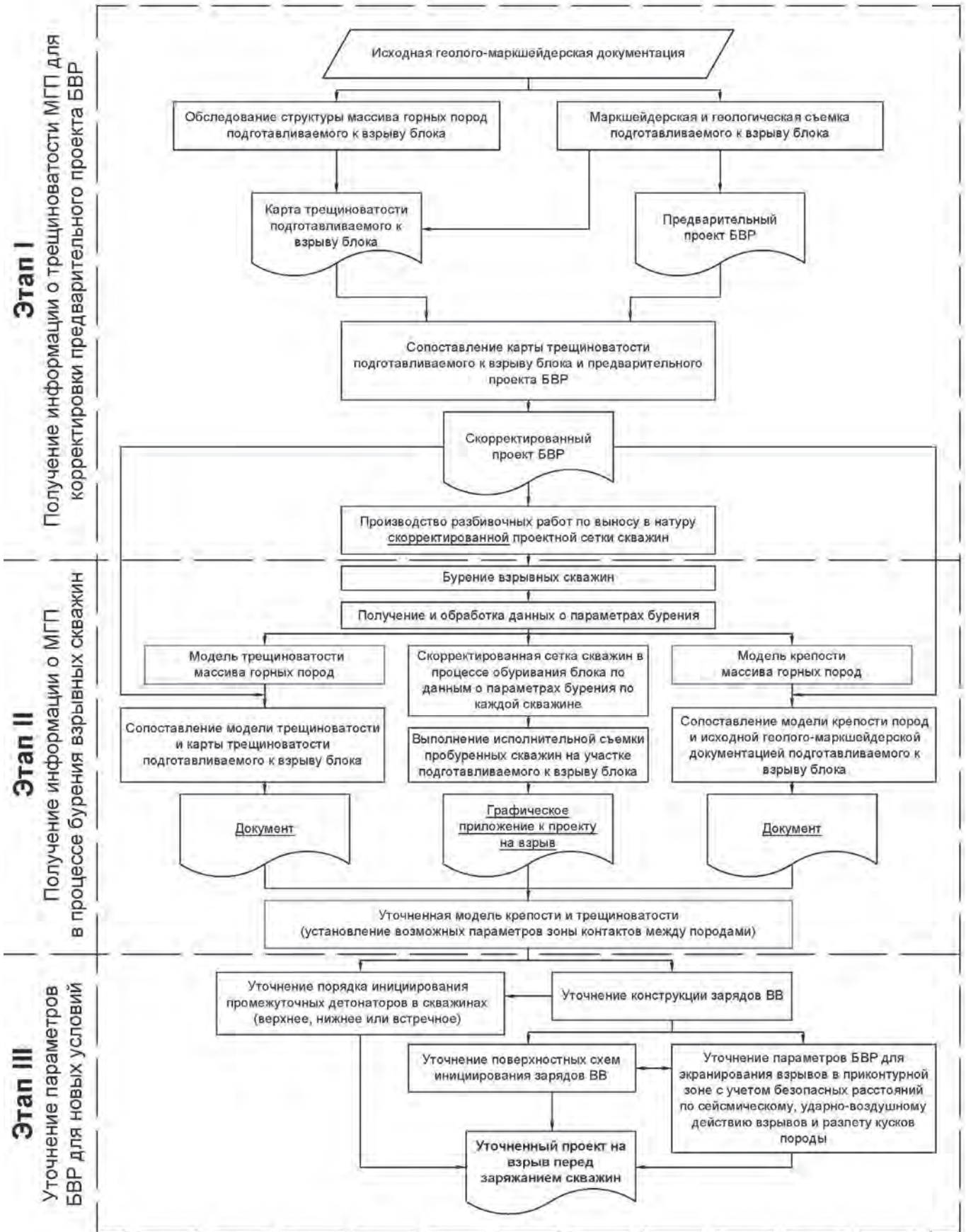


Рис. 1
 Методологические основы адаптации параметров БВР к новым условиям при разработке сложноструктурных месторождений

Fig. 1
 Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to new conditions when mining complex-structured deposits

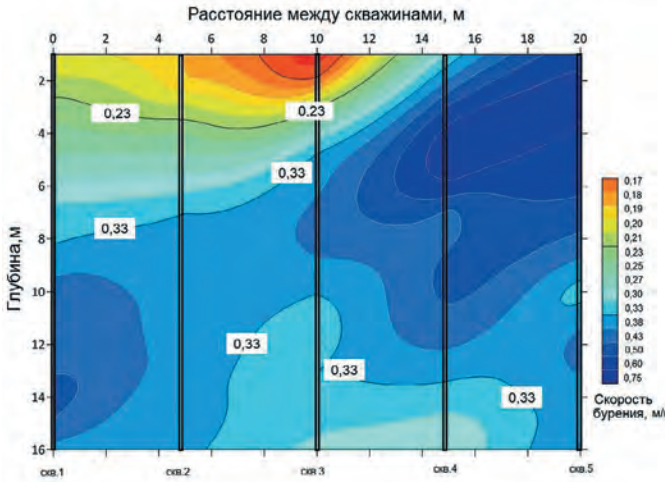


Рис. 2
Модель распространения прочностных свойств горных пород по скорости бурения (на примере пяти скважин)

Fig. 2
A model of the rock strength properties distribution by drilling speed (exemplified by 5 boreholes)

По установленным параметрам трещиноватости массива горных пород производится корректировка проектного удельного расхода ВВ, сетки скважин, конструкции заряда ВВ и порядка инициирования.

Корректировка удельного расхода ВВ, установленного в проекте по каждому метру колонки заряда ВВ, производится умножением энергоемкости обуривания горных пород технологического блока на заранее определенный коэффициент пропорциональности Π между энергоемкостью обуривания и взрывного разрушения [26], что обеспечивает расчет энергоемкости взрывного разрушения горных пород блока. Разделив энергоемкость взрывного разрушения на удельную теплоту взрыва применяемого ВВ, определяют скорректированный удельный расход ВВ.

Рациональная масса заряда ВВ в забоечной части скважины нижележащего блока по условию минимального техногенного влияния рассчитывается согласно выражению

$$Q_{\text{тр}} = ab \left[\left(\sum q_{\text{пр}i} l_i \right) + \left(\sum q_{\text{пр}i} l'_i \right) \right], \text{ кг}, \quad (1)$$

где a – расстояние между скважинами в ряду, м; b – расстояние между рядами скважин, м; $q_{\text{пр}i}$ – требуемый удельный расход ВВ на i -й отметке глубины скважины; l_i – длина заряда на i -й отметке глубины скважины; l'_i – длина заряда, который переносится в перебур на i -й отметке в забоечной части скважины.

На основе рассмотрения соотношения требуемой массы заряда в скважине $Q_{\text{тр}}$ с допустимой по условию емкости уточняется в процессе бурения сетка скважин. При $Q_{\text{тр}} > Q_{\text{доп}}$ расстояние до ближайшей скважины следующего ряда следует уменьшить на величину

$$x^1 = b \left(1 - \frac{Q_{\text{доп}}}{Q_{\text{тр}}} \right), \text{ м}. \quad (2)$$

При $Q_{\text{тр}} = Q_{\text{доп}}$ расстояние до скважины соседнего ряда принимается проектным. Если $Q_{\text{тр}} \leq Q_{\text{доп}}$, расстояние до ближайшей скважины следующего ряда увеличивают на величину

$$x^2 = b \left(\frac{Q_{\text{доп}}}{Q_{\text{тр}}} - 1 \right), \text{ м}. \quad (3)$$

Следующий этап – на основе ранее установленной модели блока производится изменение конструкции зарядов ВВ таким образом, чтобы воздушные промежутки протяженностью соответственно $L_{\text{зар}1}$ и $L_{\text{зар}2}$ располагались в зонах неоднородности массива. Тогда энергия взрыва скважинного заряда не расходуется на перемещение блоков, разделенных зонами неоднородности (трещинами), а идет на их непосредственное разрушение (рис. 3).

Порядок инициирования скважин по имеющейся информации о направлениях трещин, развитых в объеме локального блока, определяется на следующих принципах:

- чтобы качество дробления горной массы сохранялось на высоком уровне, направления инициирования скважинных зарядов ВВ должны пересекать естественные трещины вкrest их распространения;
- чтобы не допустить увеличения сейсмического эффекта, замедления поверхностной сети инициирования должны быть минимальными;
- для обеспечения компактного развала схема инициирования должна быть в соответствии с параметрами рабочей зоны.

В практике взрывания распространено обратное инициирование зарядов ВВ. Однако если по моделям установле-

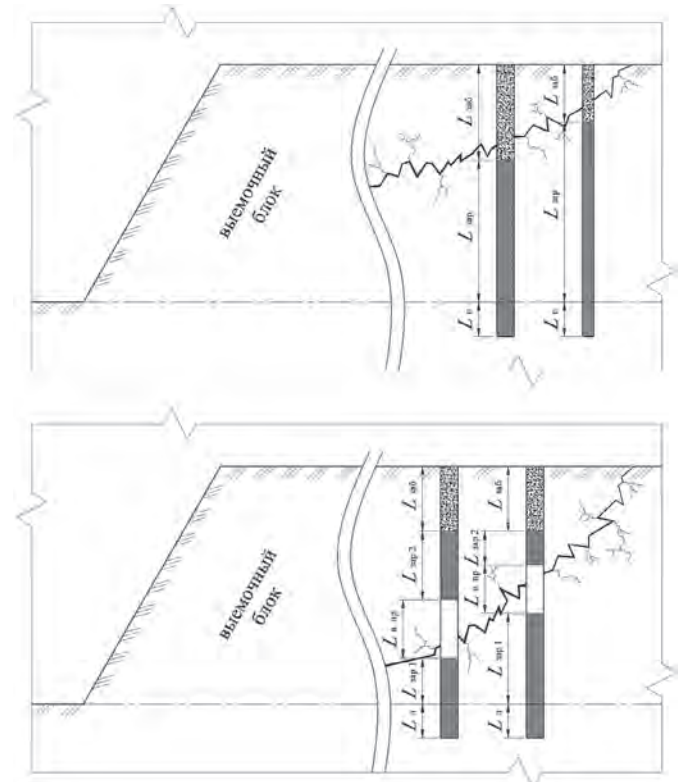


Рис. 3
Конструкции размещения ВВ по скважине в зависимости от структурных особенностей массива горных пород:
 $L_{\text{заб}}$ – длина забойки;
 $L_{\text{зар}}$, $L_{\text{зар}1}$ и $L_{\text{зар}2}$ – длина заряда;
 $L_{\text{п}}$ – длина перебура;
 $L_{\text{в. пр}}$ – длина воздушного промежутка

Fig. 3
Designs of the charge placement along the borehole depending on the structural features of the rock mass:
 $L_{\text{заб}}$ – the stemming length;
 $L_{\text{зар}}$, $L_{\text{зар}1}$ и $L_{\text{зар}2}$ – the charge length;
 $L_{\text{п}}$ – the overdrill length;
 $L_{\text{в. пр}}$ – the air gap length

Таблица 1

Выражения для прогноза уровня сейсмического воздействия взрывов на разных месторождениях при направлении инициирования зарядов ВВ в тыл борта

Table 1

Equations for predicting the level of seismic blast impact at different deposits with the explosive priming towards the rear of the wall

№	Месторождение	$R_{пр}, м/кг^{1/3}$ (зона взрыва)	Выражение для определения $V, см/с$	
			среднее значение, $V_{ср}$	максимальное значение, $V_{макс}$
1	Костомукшское железорудное месторождение	$4 \leq R_{пр} \leq 6$ (ближняя зона)	$V_{ср} = 147,7 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,78}$	$V_{макс} = 176 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,78}$
2	Джетыгаринское месторождение хризотил-асбеста [35]	$4 \leq R_{пр} \leq 10$ (ближняя зона)	$V_{ср} = 173 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,76}$	$V_{макс} = 255 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,76}$
3	Вернинское золоторудное месторождение	$4 \leq R_{пр} \leq 10$ (ближняя зона)	$V_{ср} = 161,4 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,92}$	$V_{макс} = 245 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,92}$
4	Олимпиадинское золоторудное месторождение	$5 \leq R_{пр} \leq 16$ (ближняя зона)	$V_{ср} = 659,6 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,66}$	$V_{макс} = 820 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,66}$
5	Волковское месторождение медно-железо-ванадиевых руд	$7 \leq R_{пр} \leq 28$ (ближняя зона)	$V_{ср} = 363,4 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,9}$	$V_{макс} = 840 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,9}$
6		$34 \leq R_{пр} \leq 122$ (дальняя зона)	$V_{ср} = 133,6 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,49}$	$V_{макс} = 210 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,49}$
7	Томинское месторождение медно-порфириновых руд [34]	$60 \leq R_{пр} \leq 158$ (дальняя зона)	$V_{ср} = 191 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,48}$	$V_{макс} = 232 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,48}$
8	Саткинское месторождение магнезита (Карагайский ГОК) [33]	$34 \leq R_{пр} \leq 161$ (дальняя зона)	$V_{ср} = 199,3 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,38}$	$V_{макс} = 635 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,38}$
9	Ново-Смолинское месторождение гранодиоритов	$28 \leq R_{пр} \leq 100$ (дальняя зона)	$V_{ср} = 392,4 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,53}$	$V_{макс} = 585 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,53}$

ны перемежающиеся слои пород или установлены крупные трещины, заполненные минеральным веществом, то применяется встречное (внутрискважинное) инициирование для создания встречных газовых потоков и ударных волн вблизи середины воздушного промежутка с расположенной в его объеме крупной трещиной.

Скорость колебаний частиц грунта в зависимости от направления инициирования поверхностной сети прогнозируют по выражению, предложенному акад. М. А. Садовским [27–30]:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n = R_{пр}^{-n}, \text{ см/с}, \tag{4}$$

где V – скорость колебаний частиц грунта, см/с; Q – масса одновременно взрывааемых зарядов ВВ, кг; R – расстояние от места взрыва до охраняемого объекта, м; $R_{пр}$ – приведенное расстояние, м/кг^{1/3}, определяемое как ; n – показатель степени затухания сейсмических колебаний; K – эмпирический коэффициент пропорциональности между скоростью колебаний и приведенным расстоянием.

В табл. 1 представлены выражения для прогноза сейсмического воздействия на охраняемые объекты и законтурированный массив горных пород. Эмпирические коэффициенты и показатели в уравнениях получены в результате регрессионного анализа экспериментальных данных измерений скоростей колебаний грунта на месторождениях Урала, Сибири, Карелии и Казахстана в ближней и дальней зонах взрыва [21; 31–33].

Уточнение параметров контурного взрывания при поста-

новке борта в предельное положение проводят с применением уточненной информации о прочностных характеристиках горных пород по данным, полученным с бурового станка [26; 34; 35].

С учетом прочностных характеристик горных пород, установленных в результате бурения скважин, определяется радиус развития зоны трещинообразования [26]:

$$R_{тр} = r_{скв} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{\sigma_{доп}} \right)^2}, \text{ м}, \tag{5}$$

где $r_{скв}$ – радиус скважины, м; P – давление на стенки скважины, МПа; $\sigma_{доп}$ – допустимая величина напряжений, МПа, определяемая по выражению $\sigma_{доп} = (1,1 \dots 1,3) \sigma_p$; $\sigma_p = (1,1 \dots 1,3) a \cdot \sigma_{сжф}$ – предел прочности на растяжение, МПа; a – коэффициент пропорциональности между $\sigma_{сж}$ и σ_p , определяется по паспорту прочности; $\sigma_{сжф}$ – предел прочности на сжатие, рассчитанный по фактическому значению коэффициента крепости горных пород, уточненному в процессе шарошечного бурения, МПа.

Если радиус трещинообразования по отношению к ранее определенному в проекте значению оказывается меньше, то в этом случае путем подбора ВВ с более высокими энергетическими характеристиками обеспечивают необходимый радиус развития трещин.

Скорректированные проектные параметры необходимо проверить на безопасность с точки зрения разлета кусков породы, сейсмического и ударно-воздушного действия взрыва. Для этого применяют формулы согласно Правилам безопасности при производстве, хранении и

применении взрывчатых материалов промышленного назначения². В случае когда уточненные параметры не обеспечивают необходимое качество взрывного разрушения, требуются дополнительные исследования, связанные с изменением диаметров скважин и параметров зарядов. Предложенные технические решения для адаптации рассматриваются с точки зрения их влияния на затраты производства БВР и смежные технологические процессы – экскавацию, транспортирование, измельчение руды на обогатительной фабрике.

Выводы

Установлены и систематизированы факторы, определяющие изменение условий подготовки горной массы к выемке буровзрывным способом. Позже систематизация была дополнена способами экспресс-получения информации о физико-механических характеристиках горных пород, поскольку чем большая детальность при рассмотрении свойств будет учтена, тем более высокой степени адаптации параметров БВР можно достигнуть. Разрабатываемая методика комплексной адаптации отвечает принципу поэтапного уточнения параметров разрушающей нагрузки. Первый этап заключается в получении информации о пространственном расположении структурных осо-

бенностей строения массива горных пород для корректировки предварительного проекта БВР. Второй этап состоит в уточнении прочностных и структурных характеристик горных пород в ходе бурения взрывных скважин станками шарошечного типа. На завершающем третьем этапе методики подразумевается уточнение параметров БВР для новых горно-геологических и горнотехнических условий. Процесс адаптации запускает уточнение: конструкции зарядов ВВ, поверхностной схемы инициирования, способа инициирования ПД в скважинах, параметров контурных лент для экранирования взрывов и снижения вредного воздействия взрыва на массив горных пород.

Декомпозиционное рассмотрение технологических операций в смежных технологических процессах должно учитывать зависимость от качества буровзрывной подготовки горной массы к выемке. Понимание особенностей процессов перевода массива горных пород из состояния целика в разрушенную горную массу в результате взрыва, а потом ее дезинтеграции в ходе погрузки, доставки, дробления на обогатительной фабрике обеспечит выявление присутствующих смежным технологическим процессам добычи и переработки переходных процессов, возникающих при осуществлении соответствующих операций, а изучение методов и способов адаптации обеспечит установление факторов, которые необходимо всесторонне учитывать при достижении комплексного ресурсосберегающего освоения сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых.

² Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения: в редакции Приказа Ростехнадзора от 03.12.2020 №494. (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности). Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (дата обращения: 04.02.2024).

Список литературы / References

1. Кутузов Б.Н. *Методы ведения взрывных работ*. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. 3-е изд. М.: Горная книга; 2018. 476 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/8263> (дата обращения: 02.10.2024).
2. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виницкий К.Е., Мельников Н.Н., Алешин Б.Г., Анистратов Ю.И. и др. *Справочник. Открытые горные работы*. М.: Горное бюро; 1994. 590 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/1747> (дата обращения: 02.10.2024).
3. Друкованый М.Ф., Кукиб Б.Н., Куц В.С. *Буровзрывные работы на карьерах*. М.: Недра; 1990. 367 с.
4. Парамонов Г.П., Федосеев А.В., Гапонов Ю.С. Оценка влияния трещиноватости массива на его разрушение при производстве взрывных работ. *Записки горного института*. 2013;204:294–296. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5593> (дата обращения: 02.10.2024).
Paramonov G.P., Fedoseev A.V., Gaponov Y.S. Assessment of cracked area to its destruction in the production of blasting. *Journal of Mining Institute*. 2013;204:294–296. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5593> (accessed: 02.10.2024).
5. Менчжулин М.Г., Федосеев А.В. Определение размеров зон взрывного разрушения для трещиноватых горных пород с различными заполнителями трещин на примере Михайловского ГОКа. *Записки горного института*. 2012;195:120–123. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/6116> (дата обращения: 02.10.2024).
Menchzhulin M.G., Fedoseev A.V. Amount of explosive destruction zones for cracked rocks with different crack filler for example Mikhailovsky GOK. *Journal of Mining Institute*. 2012;195:120–123. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/6116> (accessed: 02.10.2024).
6. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываеваемого массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):79–95. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79
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. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):79–95. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79
7. Bakhtavar E., Abdollahsharif J., Mohammadi D. Analysis and improvement of blasting operation in porphyry, diorite dyke, and trachyte Sungun zones: In-situ investigations. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2022;56(1):19–24. <https://doi.org/10.22059/IJMG.2021.272288.594772>

8. Aryafar A., Rahimdel M.J., Tavakkoli E. Selection of the most proper drilling and blasting pattern by using MADM methods (A case study: Sangan Iron Ore Mine, Iran). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. 2020;35(3):97–108. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.3.10>
9. Choudhary B.S., Agrawal A., Arora R. Stemming material and Inter-row delay timing effect on blast results in limestone mines. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2021;46(1):23. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01552-6>
10. Li G., Li N., Yu C., He M. Bearing capacity behaviour of prestressed anchor cable under slope blasting excavation. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(9):747. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07113-3>
11. Gómez S., Sanchidrián J.A., Segarra P. Near-field vibration from blasting and rock damage prediction with a full-field solution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020;134:104357. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2020.104357>
12. Hudaverdi T., Akyildiz O. Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction. *Environmental Earth Sciences*. 2017;76:138. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6456-5>
13. Zhou J., Zhang Yu., Qiu Y. State-of-the-art review of machine learning and optimization algorithms applications in environmental effects of blasting. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57:5. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10636-8>
14. Реготунов А.С. Методический подход к оценке и выбору технических решений при адаптации буровых работ к изменяющимся условиям на карьерах. *Проблемы недропользования*. 2023;(4):89–103. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.089>
Regotunov, A.S. A methodical approach to evaluating and selecting technical solutions for adapting drilling operations to changing conditions in quarries. *Problems of Subsoil Use*. 2023;(4):89–103. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.089>
15. Громадский А.С., Горбачов Ю.Г., Громадский В.А. Эффективность гашения динамических нагрузок методом минимизации жесткости амортизатора между буровым ставом и станком шарошечного бурения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(7):158–161. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/158_161.pdf (дата обращения: 02.10.2024).
Gromadskiy A.S., Gorbachev Yu.G., Gromadskiy V.A. Efficiency of quenching of dynamic loads damping efficiency by methods of damper stiffness minimization between the drilling rod and rotary drilling rig. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015;(7):158–161. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/158_161.pdf (accessed: 02.10.2024).
16. Опарин В.Н., Тимонин В.В., Карпов В.Н., Смоляницкий Б.Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(6):81–104. <https://doi.org/10.15372/FTP20170609>
Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N., Smolyanitsky B.N. Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary – percussion drilling technology improvement. *Journal of Mining Science*. 2017;53(6):1043–1064. <https://doi.org/10.1134/S1062739117063114>
17. Wu H., Gong M. Carriage positioning method of drill rig based on mutual constraints of dual booms. Meitan Xuebao. *Journal of the China Coal Society*. 2019;44(2):647–654. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2018.0238>
18. Реготунов А.С., Жариков С.Н., Сухов Р.И., Кутуев В.А. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири. *Проблемы недропользования*. 2021;(2):52–62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
Regotunov A.S., Zharikov S.N., Suhov R.I., Kutuev V.A. Assessment of the current state of drilling and blasting operations and the need for transition processes at some large mining enterprises in the Urals and Siberia. *Problems of Subsoil Use*. 2021;(2):52–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
19. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2018. 360 с.
20. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН; 2019. 284 с. Режим доступа: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-pereh-process.pdf> (дата обращения: 02.10.2024).
21. Жариков С.Н., Кутуев В.А. Выбор параметров взрывной отбойки в приконтурной зоне карьера. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(6):80–88. <https://doi.org/10.15372/FTP20220609>
Zharikov S.N., Kutuev V.A. Designing blast pattern for pitwall rock mass. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(6):80–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTP20220609>
22. Букринский В.А., Викторова Е.В., Киселевский Е.В., Кузьмин Ю.О., Навитный А.М., Орлов Г.В. и др. *Маркшейдерия*. М.: Изд-во МГГУ; 2003. 419 с.
23. Яковлев А.В., Шимкив Е.С. Исследование влияния основных систем трещин в массиве Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на качество дробления взорванной горной массы. *Проблемы недропользования*. 2015;(3):19–25. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/111> (дата обращения: 02.10.2024).
Yakovlev A.V., Shimkiv E.S. Studying the main cracks systems influence in rock mass of the “EVRAZ KGOK” northern open pit on the quality of blasted rock mass crushing. *Problems of Subsoil Use*. 2015;(3):19–25. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/111> (accessed: 02.10.2024).
24. Яковлев А.В., Панжин А.А., Рождественский В.Н., Пьянзин С.Р., Кочнев К.А. Оценка степени трещиноватости локальных скальных массивов, подлежащих взрывной отбойке. *Маркшейдерия и недропользование*. 2012;(5):22–29.
Yakovlev A.V., Panzhin A.A., Rozhdestvensky V.N., Pyanzin S.R., Kochnev K.A. Assessment of the degree of jointing of the blastable local rock masses. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2012;(5):22–29. (In Russ.)

25. Сухов Р.И., Реготунов А.С., Гращенко Д.А. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):446–454.
Sukhov R.I., Regotunov A.S., Grashchenko D.A. Development of a method for obtaining information on the rock mass state during production boreholes drilling. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(S37):446–454. (In Russ.)
26. Бондаренко И.Ф., Жариков С.Н., Зырянов И.В., Шеменёв В.Г. *Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2017. 172 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-burovzryvnye-raboty-na-kimberlitovyh-karerah-yakutii.pdf> (дата обращения: 02.10.2024).
27. Садовский М.А. Избранные труды. *Геофизика и физика взрыва*. М.: Наука; 2004. 440 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21916> (дата обращения: 02.10.2024).
28. Садовский М.А. *Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов*. М.; Ленинград: Изд. и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР; 1946. 29 с.
29. Zhang T., Huang J., Li X., Liu T., Bian X., Luo Y. Characteristics of the elevation amplification effect of vibration velocity in rock surrounding underground cavities under different stress conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;165:107704. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107704>
30. Haghnejad A., Ahangari K., Moarefvand P., Goshtasbi K. Numerical investigation of the impact of rock mass properties on propagation of ground vibration. *Natural Hazards*. 2019;96:587–606. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3559-6>
31. Меньшиков П.В., Таранжин С.С., Флягин А.С. Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на Карагайском карьере в стесненных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):383–398. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>
Menshikov P.V., Taranzhin S.S., Flyagin A.S. Research of seismic influence on buildings and structures of Satka town while exploding explosive works on the Karagayskiy career in constrained conditions. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020;(3-1):383–398. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>
32. Кутуев В.А., Жариков С.Н. Оценка сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты на примере Томинского месторождения. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024;(3):266–279.
Kutuev V.A., Zharikov S.N. Assessment of the seismic impact of blasting on protected objects on the example of the Tominsky field. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2024;(3):266–279. (In Russ.)
33. Кутуев В.А., Васильева Л.А., Жариков С.Н. Об устойчивости бортов карьера Джетыгаринского месторождения при ведении взрывных работ в приконтурной зоне. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(7-1):25–36.
Kutuev V.A., Vasilyeva L.A., Zharikov S.N. On the stability of the sides of the Dzhetygarinsky field quarry during blasting operations in the contiguous zone. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2024;(7-1):25–36. (In Russ.)
34. Орленко Л.П. (ред.). *Физика взрыва: в 2 т. 3-е изд., доп. и перераб.* М.: Физматлит; 2004. 823 с.
35. Баранов Е.Г., Ведин А.Т., Бондаренко И.Ф. *Малоплотные взрывчатые вещества для открытых горных работ*. М.: Недра; 1993. 107 с.

Информация об авторах

Яковлев Виктор Леонтьевич – доктор технических наук, советник РАН, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>; e-mail: yakovlev@igduran.ru

Жариков Сергей Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>; e-mail: 333vista@mail.ru

Реготунов Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5503-9397>; e-mail: pochta8400@inbox.ru

Кутуев Вячеслав Александрович – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>; e-mail: 9634447996@mail.ru

Information about the authors

Viktor L. Yakovlev – Dr. Sci. (Eng.), Advisor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Chief Research Associate, Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>; e-mail: yakovlev@igduran.ru

Sergey N. Zharikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Leading Research Associate, Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>; e-mail: 333vista@mail.ru

Andrey S. Regotunov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5503-9397>; e-mail: pochta8400@inbox.ru

Vyacheslav A. Kutuev – Research Associate, Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>; e-mail: 9634447996@mail.ru

Article info

Received: 04.10.2024

Revised: 25.11.2024

Accepted: 02.12.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.10.2024

Поступила после рецензирования: 25.11.2024

Принята к публикации: 02.12.2024