ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(7):104-122

УДК 550.3 + 622.33.013.3 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-104-122

О ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СЕЙСМО-ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ НА КАРЬЕРАХ

В.Н. Опарин[1], В.Ф. Юшкин[1], А.Н. Гришин[2], А.В. Богатырев[3], Н.Н. Пороховский[4], Д.Е. Рублев[1]

[1] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: L14@ngs.ru
[2] Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия
[3] Филиал «Бачатский угольный разрез» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь», пгт Бачатский, Россия
[4] Искитимский карьер ОАО «Новосибирское карьероуправление», Новосибирск, Россия

Аннотация: Применение высокоточных электронных систем инициирования скважинных зарядов в горном деле вызвало необходимость уточнения выбора параметров буровзрывных работ с учетом структурно-механических свойств разрушаемых пород, их изменчивости в пределах «отрабатываемого пространства» блочного массива для повышения эффективности дробления добываемого сырья. Рассмотренный подход основан на определении структурного строения, трещиноватости и прочностных параметров пород в забое с использованием данных наземного лазерного сканирования и инженерной сейсморазведки, а также скорости детонации взрывчатого вещества — по данным измерений на месте подготовки взрывных работ с использованием измерителя MicroTrap™ VOD/Data Recorder. Показано, что прочность, акустическую жесткость, скорость распространения волны взрыва необходимо учитывать при выборе линий наименьшего сопротивления, конструкции скважинных зарядов, сетки скважин, мест расположения забойки, интервалов замедления взрывания с учетом структурных особенностей блочного массива. Отмечена возможность использования для указанных целей как измерительных средств, так и экспериментальных данных сейсмо-деформационного мониторинга геомеханико-геодинамического состояния горного массива на горнодобывающем предприятии. Составление проекта буровзрывных работ с использованием указанных параметров позволяет рационализировать выбор интервалов замедления скважинных зарядов. Дана иллюстрация опробования метода на примере добычи известняка и магнетита.

Ключевые слова: четвертичные отложения, песчаник, известняк, эрозия, описание трещин, импульсное воздействие, взрывная волна, амплитудно-частотный спектр, локализация разрушений, паспорт буровзрывных работ, структурная иерархия, физико-механические свойства горных пород, карьер, сейсмо-деформационный мониторинг, нелинейные геомеханические процессы.

Благодарность: Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 17-17-01282.

Для цитирования: *Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Гришин А. Н., Богатырев А. В., Пороховский Н. Н., Рублев Д. Е.* О перспективных направлениях использования экспериментальных данных сейсмо-деформационного мониторинга в буровзрывных работах на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 104–122. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-104-122.

© В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, А.Н. Гришин, А.В. Богатырев, Н.Н. Пороховский, Д.Е. Рублев. 2019.

Promising trends for using seismic deformation monitoring data in drilling-and-blasting in open pit mines

V.N. Oparin[1], V.F. Yushkin[1], A.N. Grishin[2], A.V. Bogatyrev[3], N.N. Porokhovskiy[4], D.E. Rublev[1]

[1] Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia, e-mail: L14@ngs.ru
[2] Siberian Transport University, 630049, Novosibirsk, Russia
[3] Branch «Bachat coal mine» JSC «UK «Kuzbassrazrezugol», Bachatsky, Russia
[4] Iskitimsky quarry, JSC «Novosibirsk Quarry Administration», Novosibirsk, Russia

Abstract: Mines operate high-precision electronic priming systems, therefore it is required to improve selection of blasting pattern parameters with regard to structural and mechanical properties of rocks and their variability within a treated area in block rock mass with a view to enhancing breakage efficiency. The discussed approach is based on determination of structure, jointing characteristic and strength of rocks using data of ground-based laser scanning and engineering seismics, as well as detonation velocities of explosives—from on-site measurements taken by icro-Trap™ VOD/Data Recorder. It is shown that strength, acoustic acoustic impedance and blast wave velocity should be taken into account when selecting lines of burden, structures of explosive charges, blast patterns, stemming arrangement and delay intervals with regard to structural features of block rock mass. Both measurement tools and experimental data obtained in the seismic deformation monitoring of geomechanical and geodynamic behavior of rocks in mines are applicable to attain the objective. Design of blasting patterns using the listed parameters allows optimizing delay intervals. The method application is described in terms of limestone and magnetite production.

Key words: Quaternary deposits, sandstone, limestone, erosion, jointing description, impact, blast wave, amplitude–frequency response, damage location, blasting pattern designs, structural hierarchy, physical and mechanical properties of rocks, seismic deformation monitoring, nonlinear geomechanical processes.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 17-17-01282.

For citation: Oparin V. N., V.F. Yushkin, Grishin A. N., Bogatyrev A. V., Porokhovskiy N. N., Rublev D. E. Promising trends for using seismic deformation monitoring data in drilling-and-blasting in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):104-122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-104-122.

Введение

Современные разработки средств взрывного разрушения горных пород [1—6] при добыче твердых полезных ископаемых, полученные в результате научных исследований, лабораторных экспериментов и промышленной эксплуатации, привели к созданию высокоточных электронных систем инициирования (ЭСИ) скважинных зарядов, что позволило существенно повысить эффективность горных работ. Однако существующие методы расчета параметров буровзрывных работ (БВР) не в полной мере учитывают геомеханические свойства горного массива, а также их влияние на эффективность разрушения горных пород. Например, представленные в [1—3] методы основаны на учете приближенных величин длины забойки, перебура, расстояний между взрывными скважинами в их рядах, которые в промышленных условиях необходимо уточнять с учетом блочного строения разрабатываемого горного массива [5, 7, 8].

Состояние вопроса

Динамико-кинематические параметры сейсмических волн и механические характеристики породного массива, та-

кие как прочность, акустическая жесткость, скорость распространения волны взрыва, а также основные характеристики взрывчатых веществ (ВВ) — скорость детонации и разрушающее действие взрыва, должны учитываться как основные для уточнения методов расчета параметров БВР [1—4, 6, 8], но с учетом особенностей структурно-прочностных свойств взрываемых пород: выбора линий наименьшего сопротивления (ЛНС), конструкции скважинных зарядов, сетки скважин, мест расположения забойки, интервалов замедления взрывания между зарядами и др.

Согласно действующим техническим правилам ведения БВР [3], очередность подрыва скважинных зарядов разрешается производить одновременно или с замедлениями, что достигается как использованием электрических детонаторов, так и детонирующего шнура, для которых интервалы замедления t определяют с помощью эмпирической формулы:

$$t = A\sqrt{\frac{P}{K}}, \qquad (1)$$

где A — коэффициент, зависящий от прочностных свойств взрываемых пород, означающий удельное замедление на 1 м расстояния между соседними зарядами, с/м; P — вместимость ВВ в один погонный метр скважины, кг/м; K — расчетный удельный расход ВВ, кг/м^3.

Значения коэффициента A по рекомендациям технических правил ведения БВР [3] принимают в соответствии с данными табл. 1 в зависимости от крепости взрываемых пород.

При использовании неэлектрических систем инициирования скважинных зарядов интервалы замедления рассчитывают аналогично, с той лишь разницей, что рекомендуемая величина удельного замедления принимается в несколько раз бóльшей, чем при электрическом взрывании. Согласно рекомендациям технических условий ведения БВР [4] время замедления между рядами взрывных скважин может изменяться от 10 мс/м в твердой породе до 30 мс/м в мягкой породе.

Величина скважинного заряда определяется по формуле [3]:

$$Q = qWaH, \qquad (2)$$

где q — фактический удельный расход ВВ, кг/м^3; W — ЛНС, м; a — расстояние меж-

Таблица 1

Значения коэффициента A для различных видов горных пород по правилам БВР [3]
Coefficient A for different types of mining according to the rules of drilling-and-blasting [3]

№	Название пород	Коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова f, о.е.	Значение A, с/м
1	Особо крепкие породы: граниты, перидотиты, порфириты и др.	15—20	3
2	Крепкие породы: песчаник аркозовый, сланцы метаморфические крепкие, кварциты железные и др.	6—14	4
3	Породы средней крепости: известняк, мрамор, магнезит, сланцы филлитовые, серпентинит и др.	3—5	5
4	Мягкие породы: мергель, мел, сланцы глинистые, алевролиты, аргиллиты, уголь каменный, песчаник тонкозернистый глинистый и др.	1—2	6
Примечание. В процессе работ представленные коэффициенты допускается уточнять.			

ду скважинами в ряду, м; H — высота взрываемого уступа, м.

Здесь под ЛНС понимается кратчайшее расстояние от центра скважинного заряда до открытой поверхности, которое служит основным параметром при определении величины эффективного заряда ВВ и выбора расстояний между смежными зарядами. Эти величины необходимо корректировать по результатам опытного взрывания.

В соответствии с [3] величину ЛНС можно рассчитать по формуле

$$W = \sqrt{\frac{P}{K}}\,. \qquad (3)$$

Выбор коэффициента A согласно табл. 1 зависит от квалификации и опыта специалистов-взрывников и является в настоящее время в значительной мере субъективным. Как показывает практика, эффективность взрывной отбойки зависит не только от выбранного метода взрывания, интервалов замедления, качества ВВ, крепости пород, но также связана с развитием трещин в породах отрабатываемого забоя [5—8], что, безусловно, влияет на выбор величины ЛНС. В практике буровзрывных работ коэффициент A необходимо использовать не просто как среднее значение, характерное для конкретных горных пород, а уточнять его величину с учетом горно-геологических и структурно-геомеханических условий массива.

Таким образом, для повышения эффективности БВР существенным является корректное определение ЛНС и интервалов замедления с учетом как особенностей структурного строения массива пород, так и расположения взрывных зарядов, включая забойку скважин.

Предлагаемые решения

Определение параметров БВР в структурно-неоднородных горных массивах [5—8] связано с трудностями методического и организационно-технического плана. Ниже рассмотрен подход, основанный на использовании структурно-геомеханических параметров массива для выбора параметров электронного взрывания скважинных зарядов, отличающийся высокой технологичностью и простотой. При этом перечень контролируемых параметров может быть существенно ограничен, чтобы сократить время их определения в условиях горного производства.

Для реализации метода рекомендуется:

- определить особенности структурно-геологического строения подготавливаемого к подрыву уступа;
- уточнить прочностные параметры пород в забое с использованием данных наземного лазерного сканирования и инженерной сейсморазведки [5, 7, 8];
- установить скорость детонации ВВ по данным измерений на месте подготовки взрывных работ с использованием измерителя скорости детонации ВВ MicroTrap™ VOD/Data Recorder [9];
- выполнить расчет параметров и составить проект БВР по результатам обработки измеренных данных.

Основываясь на таком подходе, при подготовке БВР необходимо учитывать структурно-прочностные особенности горных пород, что является актуальным при разработке месторождений нерудных (по добыче угля, строительных материалов и т.д.) полезных ископаемых. Трещиноватость и крепость пород могут существенно варьировать как в пределах отдельно взрываемого блока, так и месторождения в целом. В рекомендациях [3, 10] структурные особенности породных массивов не рассматриваются, а при проведении БВР ориентируются на общие для серий взрываемых скважин параметры ЛНС и интервалы замедления между зарядами, что не всегда положительно влияет на качество и эффективность отбойки пород.

Количественное определение блочного строения бортов и уступов карьера

Месторождения юга Западной Сибири, разрабатываемые открытым способом, приурочены нередко к четвертичным и рифейским отложениям, представленным в основном песчаниками, алевролитами и карбонатными породами. Свойства карбонатных пород определяются также и кавернозно-трещинной пористостью. В целом, такая трещинность носит субвертикальный характер. Проницаемость пород является функцией направленности этих трещин, что делает определение их ориентации необходимым для планирования технологий эксплуатации месторождений, разрабатываемых открытым способом, с преобладающим заложением добычных забоев в направлениях, перпендикулярных трещиноватости.

Для определения блочно-иерархической структуры горного массива и трещиноватости пород используют методы фотопланиметрии и лазерного сканирования. Методом сканирования получают фотореалистичные 3-D модели объектов геосреды [5, 11], что наряду с увеличением скорости сбора и обработки данных обеспечивает безопасность выполнения инструментальных измерений в условиях горных работ в карьерах. В [5] при подготовке взрыва по добыче известняка, для уточнения ожидаемого характера дробления горной массы, используется метод определения линейных и угловых размеров структурных блоков «исходных» пород, где куски фракций имеют сложную полигональную форму с числом граней 8—10 и более.

Рис. 1. Фотография уступа в карьере. Слева и в центре видна крупноблочная структура, выше — породы сильно трещиноватые

Fig. 1. Picture of open pit bench. On the left and in the center—large block structure; above—heavily jointed rocks

При изменении трещиноватости в пределах подготавливаемого к подрыву блока, наличии включений различных пород и/или изменении прочностных свойств массива при его разгрузке необходимо оптимизировать сетку скважин, уточнять ЛНС, интервалы замедления, что требует «индивидуального» подхода к расчету и выбору параметров заряжания, интервалов замедления по каждой скважине. Для реализации такого подхода следует предварительно проводить наземное лазерное сканирование участка горного массива, подготавливаемого к подрыву.

На рис. 1 показана фотография выбранного к подрыву уступа в карьере известняка, на откосе которого выделяются участки блоков преимущественно наклонной (местами переходящей в горизонтальную) слоистости — в зависимости от степени трещиноватости пород по высоте; на рис. 2 показана его фотореалистичная модель с определением углов наклона напластований к горизонту, полученная с помощью лазерного сканера Scan Station 2.

Определение пересечения скважинами зоны разлома в глубине массива

Как известно, наличие трещиноватых зон, сопутствующих тектоническим нарушениям в глубине массива, существенно влияет на эффективность ведения буровзрывных работ. Для определения их

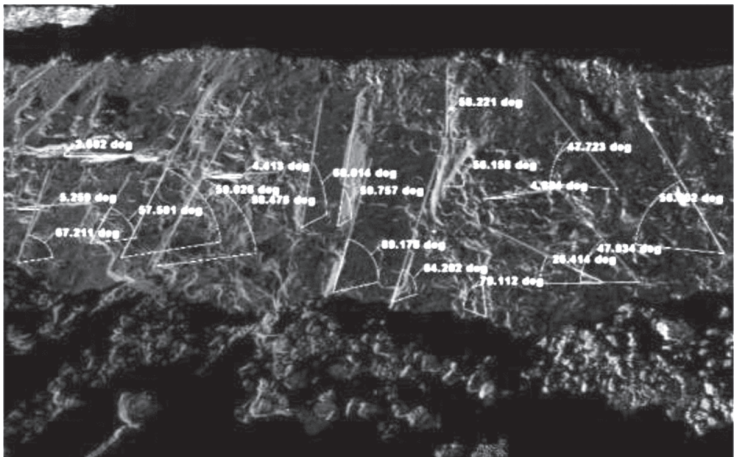

Рис. 2. Фотореалистичная 3-D модель откоса с указанием углов наклона напластований пород к горизонту

Fig. 2. Photorealistic 3D model of pitwall slope with indicated angles of bedding relative to horizon

местоположения при подготовке взрыва производят зачистку забоя и выбирают участки сканирования поверхности откоса для определения структурного строения и трещиноватости пород. При выборе точек стояния сканера производят «минимизацию» неоднородных плоскостей сканируемой поверхности, которые становятся невидимыми при съемке. Малые углы сканирования создают отклонения в данных, которые могут быть существенными, и без «внимательной интерпретации» результирующая 3-D модель становится недостаточно надежной при реконструкции геообъекта. Для связи данных с разных точек стояния сканера используют опорные марки и привязку к маркшейдерским координатам [5, 11].

Обработка данных сканированного объекта производится с помощью специализированного программного средства Cyclone фирмы Leica. В результате создается фотореалистичная точечная цифровая 3-D модель откоса, на основе которой определяют развитие напластований и производят оценку структурного строения подготавливаемого к подрыву уступа [5, 11]. Подробно метод определения структурных параметров неоднородного массива с использованием 3-D модели его поверхности изложен в работах [5, 7, 11].

По данным маркшейдерских измерений в системе AutoCAD разрабатывается план бурения скважин. После экспорта плана в Cyclone на основе 3-D модели выполняют построение скважин в массиве. Вдоль напластований откоса производят реконструкцию трещин, имеющих соответствие по углам наклона. Для выбора расчетных точек на 3-D модели откоса выделяется поверхность напластования, ее координаты экспортируются в числовой формат. С учетом шероховатости объекта методом обратных квадратов вычисляются координаты точек с минимальным отклонением относительно напластования. По координатам этих точек выполняют построение плоскости, характеризующей развитие трещин, которую продлевают вглубь массива. Проецирование плоскости на сетку скважин позволяет определить глубину пересечения их трещинами. На рис. 3 показана схема определения мест пересечения плоскости трещин со скважинами с использованием данных 3-D модели поверхности откоса уступа.

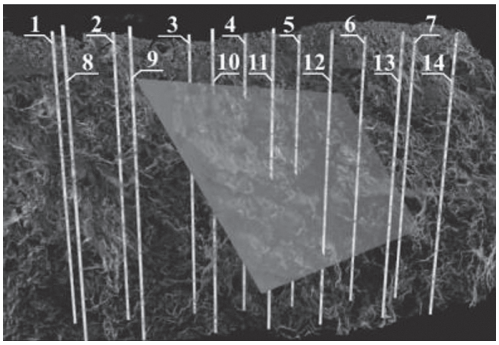

Рис. 3. Пример построения плоскости трещин, прогнозируемой по напластованию пород откоса, и определение мест пересечения ее со скважинами по данным наземного лазерного сканирования

Fig. 3. Example of plotting plane cracks predicted in the line of bedding of the pitwall rock mass and location of intersection between the plane and blast holes by the ground-based laser scanning data

Введение «плоскости трещин», идентифицируемых по естественным напластованиям откоса, позволяет продолжить ее в массив, что обеспечивает возможность определения развития трещинных разломов по глубине уступа на планируемом к подрыву участке. Для идентификации и уточнения положения зоны разлома в массиве дополнительно следует учитывать геологические признаки. На модели откоса, в соответствии с планом бурения, с помощью функций программы Cyclone выполняется построение сетки скважин подрыва и определяется их реальное положение по глубине уступа [5, 11, 13]. Построения позволяют установить: как трещины, пересекая ряды взрывных скважин (см. рис. 3), создают объемные нарушения сплошности в массиве. Наличие трещин обычно сопряжено с каналами проникновения продуктов взрыва в краевой части массива, что наряду с понижением прочности и изменения динамико-кинематических свойств пород снижает эффективность взрывных

Таблица 2

Глубины пересечения зоны трещин скважинами
Intersection depth of blast holes and zone of cracks

Номер скважины	Глубина пересечения, м	Номер скважины	Глубина пересечения, м	Номер скважины	Глубина пересечения, м
4	3,2	6	13,5	11	7,7
5	8	7	13,0	12	12,2

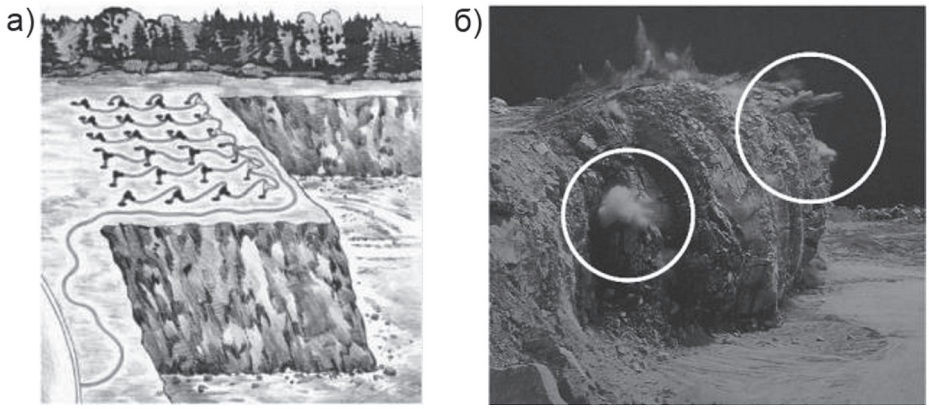

Рис. 4. Уступ карьера, подготовленный для подрыва (а), и фотография разрушений борта с указанием мест прорыва продуктов взрыва по трещинам между блоками [12] (б)

Fig. 4. Open pit bench prepared for blasting (a) and picture of damaged pitwall with specified points blast product runout along the joints between blocks [12] (b)

работ и качество дробления, приводя к увеличению выхода негабарита.

В табл. 2 приведены численные значения глубин пересечения зоны трещин со скважинами, определенные в соответствии с планом бурения, показанном на рис. 3. Параметры глубины пересечения трещин со скважинами являются основанием для рассредоточения зарядов и выбора размеров забойки скважин при подготовке взрыва. Уточнение мест фактического пересечения скважинами трещин разлома может производиться в полевых условиях с помощью видеокаротажного зонда в процессе выполнения буровых работ.

На рис. 4 схематично показан защемленный с двух сторон уступ скальных пород в карьере, подготовленный к подрыву с подключением системы инициирования зарядов по группам вертикальных скважин (а) и приведена фотография его подрыва с указанием мест прорыва продуктов взрыва по трещинам между блоками пород (б).

О механизме разрушения блочных сред при подрыве скважинных зарядов

При разрушении горных пород под действием взрыва происходит их рыхление и разделение на фракции определенной крупности, с одновременным сдвижением горной массы в направлении ЛНС до ближайшего свободного пространства. Однако специфика строения горного массива вносит существенные коррективы.

Анализ результатов действий взрыва в блочных геосредах показывает, что зоны взрывного дробления пород имеют «крестообразную» форму, основные разрушения локализуются в направлениях бóльших площадей контакта геосреды с отдельностями, содержащими заряд, и по этим направлениям формируются смещения разрыхляемой горной массы, а также происходит развитие проникающих трещин.

Представления о многоуровневом дроблении пород основаны по существу на учете распределения плотности энергии взрыва по кускам раздробленной горной массы в виде блоков полигональной (псевдокубической или псевдотетраэдрической) формы. Такой подход позволяет использовать результаты модельных испытаний нагружения блочных сред до разрушения на стендовом оборудовании [5, 14, 15], а также данные о размерах блоков пород, полученные при лазерном сканировании — для уточнения механизмов разрушений при взрыве.

На рис. 5, *а* показана схема рассредоточения заряда в скважине с перекрытием забоечным материалом места пересечения зоны трещин скважиной (в метрах), где наклон трещин выбран в соответствии с углами напластований, выделенных на рис. 3. Представленная схема позволяет предотвратить или уменьшить выход газообразных продуктов взрыва по трещинам в краевой части массива, что повышает время работы продуктов взрыва и увеличивает перемещение фронта разрушения материала, расширяя зону эффективного действия волны сжатия. Это улучшает проработку массива продуктами взрыва, повышает качество дробления пород, снижает выход негабарита. «Хаотичность» разрушений определяется расположением разрывных дислокаций в зоне действия волны сжатия, формируемой при взрыве [1, 2].

На рис. 5, *б* показана схема ожидаемых разрушений в породном массиве из-за сжатия блочной среды продуктами взрыва скважинного заряда. Пунктиром показано возможное положение геоблоков квазипрямоугольной формы до начала действия волны сжатия. Характер разрушений на рис. 5, *б* представлен по фактическим данным одноосного сжа-

тия модели блочной среды на стенде «плоского» нагружения при слабом боковом отпоре [14, 15], основываясь на допущении, что возникающую при взрыве волну сжатия в каждый момент времени можно рассматривать как формируемую в «квазистатическом» режиме нагружения ее вещественного носителя — деформируемого объема горных пород. Это, с учетом критериев подобия, позволяет получить более адекватные представления о реальном механизме дробления горных пород и образования технологически необходимых по размерам фракций горной массы при взрыве. На рис. 5, *б* параметр δ показывает максимальные и минимальные размеры расхождения берегов трещин между блоками обсуждаемой модели; количество сформировавшихся при разрушении блоков кратно $\sqrt{2}$ и описывается канонической шкалой иерархических представлений [5, 15].

Необходимость улучшения качества дробления разнотипных пород при взрыве требует приближения гранулометрического состава разрушаемой горной массы к товарным стандартам (не только сокращение объема негабарита) с целью снижения затрат на переработку сырья в заводских условиях, что актуально для горно-перерабатывающих предприятий.

К определению параметров взрывной волны в породном массиве

Алевролиты, песчаники четвертичных отложений, карбонатные породы рифейских отложений являются неоднородными, азимутально анизотропными средами, характеризующимися латерально направленной трещиноватостью, поэтому выявление ее вариаций по глубине и площади геофизическими методами для уточнения технологий ведения открытых горных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых юга Западной Сибири является актуальным. Здесь

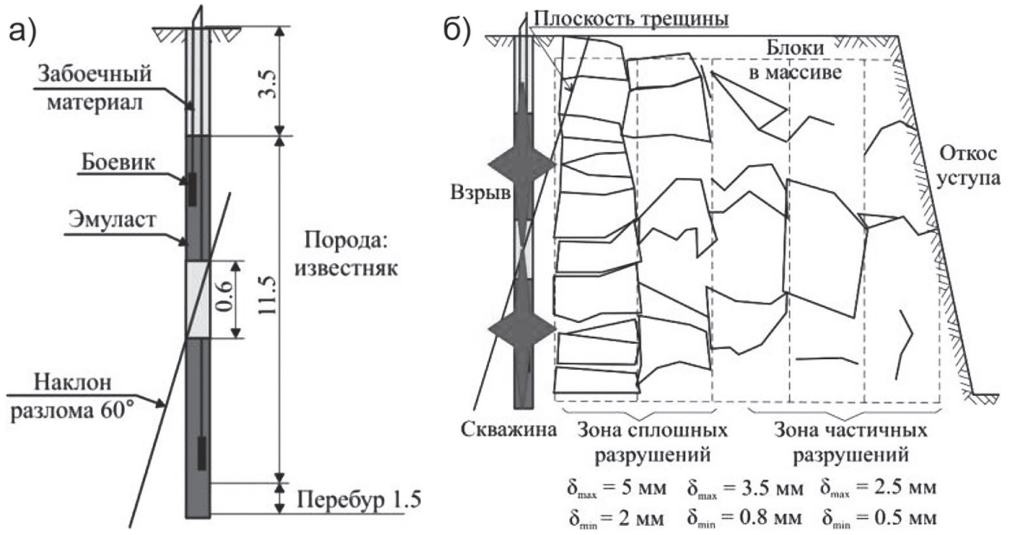

Рис. 5. Схемы рассредоточения заряда в скважине, пересекающей зону разлома (а), и разрушений краевой части известняка при сжатии пород продуктами взрыва (б). Трещины и блоки, формирующиеся при взрыве, показаны сплошными линиями (характер разрушений подтверждается результатами визуального осмотра и данными лазерного сканирования взорванной горной массы)
Fig. 5. Charge decoupling in blast hole crossing the fault zone (a) and damages of limestone edge area in compression of rocks by explosion products (b). Joints and blocks initiated by blasting are denoted by solid lines (mode of failure is confirmed by visual inspection and laser scanning of blasted rocks)

возникают задачи совершенствования методов сейсморазведочного профилирования в плане мониторинга горного массива для выявления его трещиноватости и, на основании обработки синтетических данных, применения их при ведении горных работ.

Анализ сейсмических колебаний пород при подрыве групп скважинных зарядов вблизи поверхности обнажения в массиве известняка показывает, что частоты максимумов спектральной плотности сейсмической волны, формируемой при взрыве, по мере ее распространения в массиве определяются формированием низкочастотных компонентов, обусловленных как блочным строением пород, так и параметрами буровзрывных работ, определяемых в том числе и высотой взрываемого уступа, диаметром и глубиной скважин [1, 2, 5, 16].

Для определения спектральной плотности сейсмической волны от взрыва в массиве используется натурная запись скорости смещений пород при последовательном подрыве групп скважинных зарядов. На рис. 6 показаны амплитудно-частотные спектры для волновых пакетов по скорости смещений пород для трех взрывов, произведенных в массиве известняка с разными размерами уступов и параметрами бурения скважин. На спектрограммах видно, что увеличение высоты уступа приводит к смещению спектра упругих волн в высокочастотную область, а увеличение диаметра скважин (пропорционально величине заряда) — в низкочастотную. Данные обработки спектрограмм выделения частот с характерными их диапазонами по уровням дискретизации приведены в табл. 3.

Точки измерений относительно взрываемого блока выбирались с учетом того, что интенсивность механических возмущений при действии сейсмической волны взрыва не выходит за пределы значений, при которых происходит нарушение

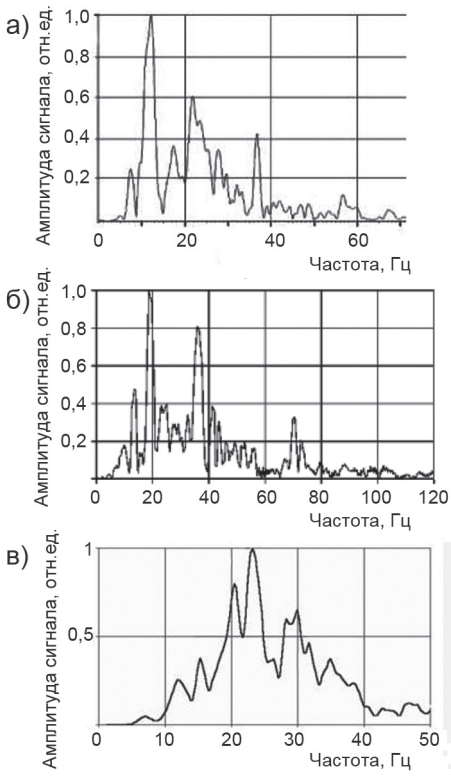

Рис. 6. Спектральные плотности сейсмической волны взрыва при подрыве уступа высотой 15 м, диаметр скважин 220 мм (а) и 160 мм (б), и уступа высотой 10 м, диаметр скважин 160 мм (в)

Fig. 6. Spectral densities of seismic waves in blasting of bench 15 m with hole diameter of 220 mm (a) and 160 mm (b) and bench 10 m with hole diameter of 160 mm (c)

естественной сплошности в массиве пород. Здесь, наряду с зависимостью (в пределах эксперимента) несущих частот максимальных амплитуд спектральной плотности от параметров используемых скважинных зарядов, проявляются частоты, которые, в том числе, определяются собственными колебаниями блоков пород на участке подрыва. При воздействии волны взрыва в массиве формируется низкочастотная (маятниковая) ее компонента, кратная $\sqrt{2}$ по линейке выделяемых частот максимальных амплитуд в диапазоне до 30 Гц.

Таблица 3

Спектральные характеристики волны взрыва, формируемой в породном массиве при подрыве групп скважинных зарядов в карьере

Spectrum of blast wave generated in rock mass by multiple charge priming in open pit mine

№	Наименование параметра	Численные значения параметров, определенные при обработке спектрограмм, показанных на рис. 6		
		а	б	в
1	Высота уступа, м	15	15	10
2	Диаметр скважины, мм	220	160	160
3	Частота максимальной амплитуды спектра, Гц	12	19	24
4	Частота, превышающая 0,7 максимальной амплитуды спектра, Гц	—	35	21
5	Частота, превышающая 0,5 максимальной амплитуды спектра, Гц	21	—	28, 30
6	Диапазоны частот 0,4 максимальной амплитуды спектра, Гц	10—13, 21—25	12—13, 18—20, 34—38	18—25, 27—31
7	Диапазоны частот 0,2 максимальной амплитуды спектра, Гц	9—14, 16—26, 27—30, 36—38	12—14, 18—39, 40—44, 69—73	11—39
8	Объем блоков размером более 700 мм (выход негабарита по данным наземного лазерного сканирования), %	1,5	1,1	менее 1

Как видно из табл. 3, влияние сейсмических воздействий от волны взрыва на горный массив свидетельствует о том, что частоты собственных колебаний породных блоков зависят от: размеров уступа; иерархического строения на участке расположения групп скважинных зарядов; параметров БВР [5, 16]. По мере увеличения времени динамического воздействия на породный массив частоты максимальных значений спектров колебаний, выделяемых по интервалам ступеней замедления при подрыве групп скважинных зарядов, изменяются немонотонно и с тенденцией смещения в высокочастотную область.

Контроль особенностей распространения упругих волновых пакетов от импульсных воздействий в горных массивах и сейсмических волн, возбуждаемых при взрывах в карьерах юга Западной Сибири [5, 16], указывает на снижение амплитуд смещений и «размытость» спектров частот проходящих волн на участках повышенно трещиноватых (раздробленных) пород, с характерным появлением меньших по амплитуде пиков спектра в области высоких частот. Представленные результаты по существу отражают связь между выделенными частотными диапазонами спектров проходящих упругих волн и степенью нарушенности горного массива (табл. 3) через его блочность.

К определению геомеханических свойств горных пород по данным сейсмических измерений

Как известно, разделение упругих волн на продольные и поперечные при многоволновых глубинных исследованиях породных массивов позволяет определять наличие и параметры азимутальной сейсмической анизотропии, вызванной ориентацией трещиноватости горных пород. В породах с разной трещиноватостью затухание волн напряжений, фор-

мируемых взрывом при разрушении, может происходить с интенсивностью, изменяющейся по экспоненциально-ступенчатому виду, как показано на рис. 7 [8]. Здесь скорость V распространения упругой волны и акустическая жесткость R пород представлены соотношением

$$R = \rho V, \qquad (4)$$

где входящие сюда параметры определяются по данным натурных измерений в породном массиве.

Горный массив содержит, как правило, включения пород различного литотипа, пронизанных иерархически построенными системами трещин [5, 7, 11, 13], что оказывает существенное влияние на величины скоростей распространения упругих волн. На границах раздела сред с разной акустической жесткостью сейсмические волны изменяют свое направление, при этом возникают эффекты их отражения и преломления. Чем существеннее отличаются величины акустической жесткости разнотипных сред на границах раздела, в том числе с учетом особенностей их трещиноватости, тем интенсивнее идет перераспределение энергии взрыва между контактирующими слоями и структурными отдельностями горных пород.

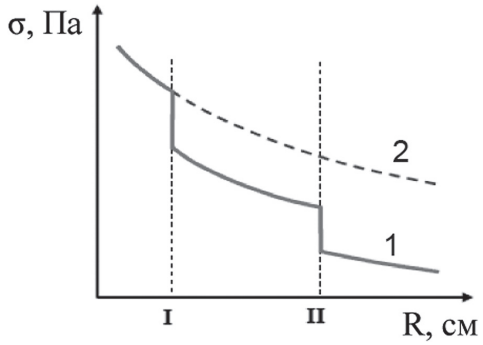

Рис. 7. Графики затухания энергии взрыва в трещиноватом (1) и монолитном (2) массиве: I, II — плоскости трещин в массиве согласно [8]

Fig. 7. Diagrams of blast energy attenuation in jointed (1) and solid (2) rock mass: I, II—planes of cracks in rock mass according to [8]

Натурные измерения акустической жесткости пород между рядами смежных скважинных зарядов взрываемого блока пород основаны на методах сейсмической разведки [10, 16–23]. Их реализация заключается в использовании устройств возбуждения и приема механических колебаний, которые устанав-

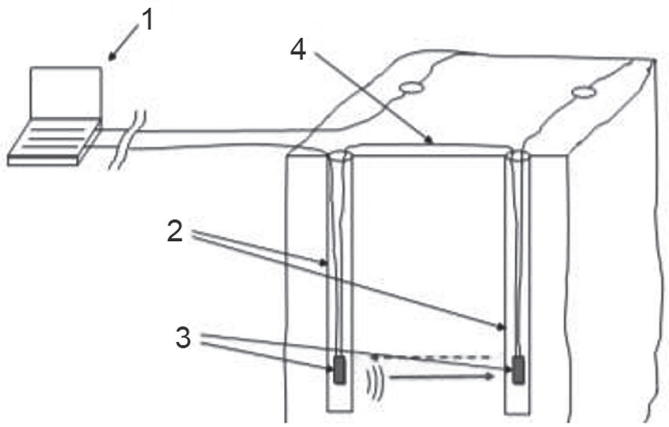

Рис. 8. Схема измерения акустической жесткости горных пород в массиве [17]: 1 — ноутбук; 2 — взрывные скважины; 3 — устройства для возбуждения (слева) и приема (справа) механических колебаний в породах; 4 — подключение устройств к блоку управления и ноутбуку

Fig. 8. Measurement of acoustic impedance in rock mass [17]: 1—laptop; 2—blast holes; 3—devices for excitation (left) and receiving (right) of mechanical vibrations in rocks; 4—connection of the devices to the control unit and laptop

ливают в смежные скважины на контролируемом участке отрабатываемого массива согласно рис. 8. Управление сейсмоизмерительной аппаратурой и обработку экспериментальных данных осуществляют с помощью компьютера.

Этот метод был опробован [5, 24] применительно к условиям рудника с использованием результатов определения скорости распространения упругих колебаний в породах магнетита и сланцев, а также карьера по добыче известняка. Массив магнетита пересекала зона разлома, заполненная трещиноватыми сланцами. Визуально было отмечено достаточно плотное смыкание структурных блоков пород между стенками отделяющих их трещин. Механические колебания возбуждались ударом бойка по борту выработки в массиве магнетита с противоположных от зоны разлома сторон. Результаты определения скорости распространения сейсмических колебаний на участках измерений, расчета акустической жесткости по (4) и выбора интервалов замедления по (5) представлены в табл. 4.

Учитывая, что поверхность сопряжения сланцев и магнетита при отбойке руды может располагаться между рядами взрывных скважин, то можно предположить, что акустическая жесткость на участке смежных пород (по границе разлома) отличается от жесткости участков, сложенных однородными породами. Это фактически иллюстрируют графики скорости распространения импульсных волновых пакетов на участках разломных зон, представленные в [5, 24], как для сопрягаемых участков пород (на примере магнетит — сланец в подземных условиях рудника), так и для трещинно-карстовых зон в бортах карьера.

О выборе и оценке интервалов замедления при взрывании горных пород

Одним из основных параметров осуществления «массовых» взрывов является время замедления инициирования зарядов. В 60-х годах прошлого века Р.К. Галеутдиновым и другими исследователями [25] предложены методы расчета «времени замедления», основанные на использовании геомеханических параметров массива горных пород, таких как скорость распространения упругой волны в массиве, акустическая жесткость и др. Однако отсутствие необходимых технических возможностей не позволило в тот период реализовать выдвинутые ими идеи. В настоящее время разработаны ЭСИ, производимые в промышленных масштабах компаниями Orica, Davey Bickford, AEL и др., что позволяет «гибко» выбирать интервалы короткозамедленного взрывания (КЗВ) и соответственно проектировать БВР.

Представленные согласно [5, 24, 26] в табл. 4 расчетные параметры иллюстрируют изменение скорости распространения сейсмических волн и акустической

Таблица 4

Результаты определения скорости распространения колебаний в породах магнетита и сланцев, расчета акустической жесткости и выбора интервалов замедления по (4) и (5)
Resultant velocities of vibrations in magnetite and shale rock mass, calculated acoustic impedances and selected delay intervals using (4) and (5)

Порода	Магнетит плотностью 7,9 т/м^3	Сланец плотностью 2,8 т/м^3
Скорость распространения волны V, км/с	7,5	4,7
Акустическая жесткость R, т/с · м^2	$59{,}2 \cdot 10^3$	$13{,}2 \cdot 10^3$
Интервал замедления взрывания, мс	7	11

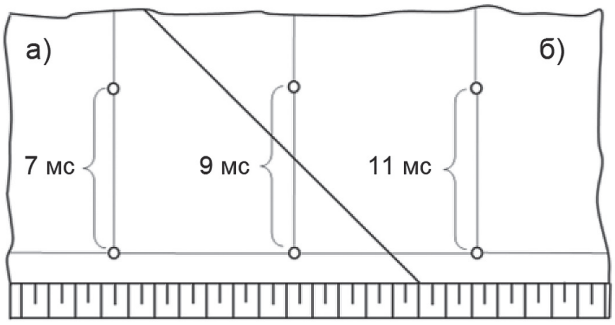

Рис. 9. Схема группирования скважин по ступеням замедлений на участке магнетита (а) и сланцев (б)
Fig. 9. Grouped blast holes by delay stages in magnetite (a) and in shale (b)

жесткости в разнотипных породах в зависимости от их структурно-геологического строения и показывают необходимость выбора соответствующих интервалов замедления при подрыве групп скважинных зарядов во время проведения массовых взрывов как в условиях ведения подземных, так и открытых горных работ. По рекомендациям [17, 25] скорость распространения сейсмической волны в блочном массиве может использоваться как параметр для определения интервалов замедления при взрывании групп скважинных зарядов. Так интервал КЗВ в системах ЭСИ рекомендуется определять по формуле, предложенной Р.К. Галеутдиновым [25]:

$$t \le 10\frac{a}{C_P}. \qquad (5)$$

Интервалы КЗВ, оцененные по (5), для приведенных в работе [24] условий, представлены в табл. 4. В неоднородной среде «магнетит-сланец» интервал замедления составит по величине ~9 мс. Схема группирования скважинных зарядов с учетом приведенных в табл. 4 ступеней замедлений для рассматриваемого сочетания взрываемых пород показана на рис. 9. Очевидно, что оптимальное время замедления может варьировать в пределах групп скважинных зарядов.

Таким образом, выбор интервалов замедления для конкретных видов раз-

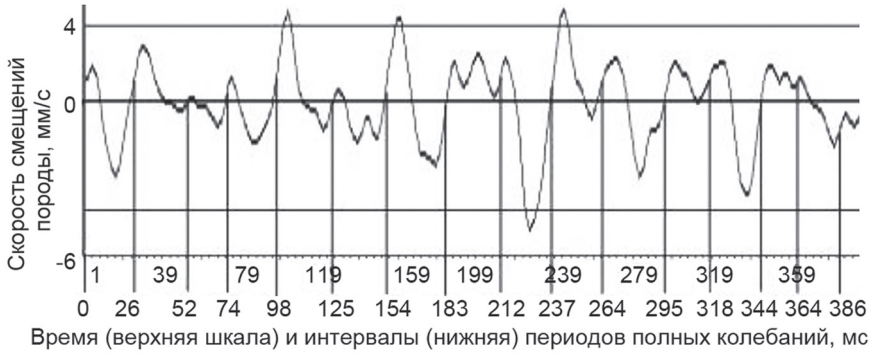

Рис. 10. Запись упругих колебаний пород известняка при взрыве на удалении 400 м. На нижней горизонтальной шкале выделены фактические периоды сейсмических колебаний пород при подрыве групп скважинных зарядов с интервалом замедления 25 мс [5]
Fig. 10. Recorded elastic vibrations in limestone under blast at a distance of 400 m. The low horizontal scale marks actual periods of seismic vibrations in grouped charge blasting at the delay interval of 25 ms [5]

рушаемых пород можно уточнять с помощью анализа сейсмограмм от взрыва [5], формирующегося при последовательном подрыве групп скважинных зарядов. Это позволяет определять отклонения моментов инициирования зарядов от их номинальных значений. На рис. 10, для примера, показана исходная запись скорости смещений пород при действии сейсмической волны взрыва, где по ординате указана амплитуда скорости вертикальных смещений пород известняка [5], по абсциссе — фактическое время вступления волны от момента запуска сейсмостанции на «запись сигнала». По сейсмограмме видно, что вступления упругих волн при срабатывании соответствующих групп скважинных зарядов не всегда совпадают с интервалами замедления, принятыми в реализуемом проекте БВР. Причины значительных отклонений связаны с изменением структурно-механических свойств пород по мере распространения упругой волны от взрыва в зоне разрушений, величиной зарядов, «погрешностью» во временных интервалах инициирования их подрыва.

Таким образом, получение экспериментальных данных о структурном строении геосреды и акустической жесткости пород между рядами смежных скважин позволяет выбрать рациональные параметры ведения БВР. Измеренные геомеханические параметры могут быть положены в основу формул расчета величин зарядов и интервалов КЗВ, которые представляют собой функции, зависящие от акустической жесткости R пород как между парами, так и между рядами смежных скважин, скорости детонации D, теплоты взрыва Q ВВ, расстояния a между скважинами: $t = F(A, D, Q, a)$.

В заключение следует отметить, что настоящая работа выполнена авторами в развитие начатого ими цикла исследований [5, 24, 27] по реализации основополагающих идей, сформулированных в [28, 29], относящихся к физике и геомеханике формирования очаговых зон разрушения горных пород в их напряженных массивах блочно-иерархического строения, во многом связанных с механизмами трансформации упругой энергии в формирующихся от взрывов зонах технологического разрушения пород в кинетическую энергию движения их структурных элементов. Как показывает опыт экспериментально-теоретических исследований [28], здесь велика роль у нелинейных упругих волн маятникового типа, динамико-кинематические характеристики которых непосредственно зависят (в отличие от «линейных» P- и S-волн) от напряженно-деформированного состояния горных пород, их блочно-иерархического строения и энергии взрывов: то есть определяют конкретную структуру функции $F(A, D, Q, a)$. Для аналитического описания индуцируемых этими волнами процессов разрушения наиболее адекватными оказываются описываемые в [28] спектральный анализ нелинейных динамических систем (блочные геосреды) и энергетический «балансовый» подход к оценке очаговых зон разрушения горных пород с позиций их энергетического состояния как консервативных или квазиконсервативных механических систем. Для этих целей может использоваться описываемый в [28] безразмерный энергетический критерий объемного разрушения горных пород, получивший широкую натурную апробацию, в том числе и на примере достижения наиболее эффективных режимов бурения скважин в различных типах горных пород, включая особо крепкие [30].

Вывод

Таким образом, применение высокоточных электронных систем инициирования скважинных зарядов при ведении горных работ имеет значительный

потенциал как для повышения технологической эффективности отработки месторождений твердых полезных ископаемых, так и с позиций обеспечения устойчивости подземных горных выработок в рудниках, бортов и откосов в карьерах. В дополнение к существующим методикам выбора параметров буровзрывных работ при проектировании массовых взрывов необходимо учитывать структурно-геологическое (блочно-иерархическое) строение пород массива, разрушаемых взрывом, с учетом их изменчивости в пределах «отрабатываемого пространства». Для реализации этих целей рекомендуется применять методические подходы и измерительные средства активно развиваемых ныне сейсмо-деформационных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности функционирования горнодобывающих предприятий Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефремов Э.И.*, *Петренко В.Д.*, *Пастухов А.И.* Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. — Киев: Наукова Думка, 1990. — 120 с.

2. *Кутузов Б.Н.* Методы ведения взрывных работ. Ч. 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности. — М.: Изд-во «Горное дело», 2011. — 512 с.

3. *Технические* правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. — М.: Недра, 1972. — 240 с.

4. *Stig O. Olofsson* Applied explosives technology for construction and mining. APPLEX, 1990. P. 315.

5. *Oparin V.N.*, *Yushkin V.F.*, *Porokhovsky N.N.*, *Grishin A.N.*, *Kulinich N.A.*, *Rublev D.E.*, *Yushkin A.V.* Effect of large-scale blasting on spectrum of seismic waves in a stone quarry // Journal of Mining Science. 2014. Vol. 50. No 5, pp. 865—877.

6. *Rossmanith H.P.* The Mechanics and Physics of Electronic Blasting. ISEE: 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique: February 2—5, 2003: Nashville, Tennessee, USA: Vol. 1, pp. 83.

7. *Oparin V.N.*, *Tanaino A.S.* A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (2015), http: // dx.doi.org / 10/1016 / j. jrmge. 2014. 12. 004.

8. *Мосинец В.Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.

9. Измеритель скорости детонации взрывчатого вещества MicroTrap™ VOD/Data Recorder. [Электронное издание]. — Канада: MREL Group of Companies Limited, 2011. Режим доступа: http://tekhobor.ru/catalogs/meashuring/mrel/MREL_Recorders_and_Accessories_List.pdf.

10. *Ханукаев А.Н.* Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 200 с.

11. *Рождественский В.Н.*, *Панжин А.А.*, *Пьянзин С.Р.*, *Кочнев К.А.* Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 75—78.

12. Описание системы «Нонель». [Электронное издание]. — Швеция: фирма «Дино-Нобель», 1998-08. Режим доступа: http://striletsa.ucoz.ru/_ld/0/5__NONEL_.pdf.

13. *Пьянзин С.Р.*, *Яковлев А.В.*, *Панжин А.А.*, *Рождественский В.Н.*, *Кочнев К.А.* Оценка степени трещиноватости локальных массивов, подлежащих взрывной отбойке // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 5. — С. 22—29.

14. *Курленя М.В.*, *Опарин В.Н.*, *Бобров Г.Ф.*, *Акинин А.А.*, *Востриков В.И.*, *Юшкин В.Ф.* О расклинивающем эффекте зон опорного давления // ФТПРПИ. — 1995. — № 4. — С. 3—11.

15. *Опарин В.Н.*, *Юшкин В.Ф.*, *Жигалкин В.М.*, *Симонов Б.Ф.*, *Аршавский В.В.*, *Тапсиев А.П.* Особенности разрушения одномерной модели блочных сред при длительном одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2002. — № 4. — С. 81—93.

16. *Юшин В.И.*, *Геза Н.И.*, *Юшкин В.Ф.*, *Полозов С.С.* Измерение динамических деформаций и истинных движений скального грунта вблизи очага карьерного взрыва с помощью сейсмических датчиков // ФТПРПИ. — 2010. — № 5. — С. 34—43.

17. *Проскуряков В. М., Бляхман А. С.* Сейсмические методы исследования напряженного состояния горного массива. — М.: Недра, 1983. — 192 с.

18. *Яковлев А. В., Бусаргина Е. С., Мельник В. В., Замятин А. Л.* Районирование массива горных пород карьеров ОАО «Евраз КГОК» по категориям взрываемости. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2013. — 30 с.

19. *Adushkin V. V.* Blasting-induced seismicity in the European part of Russia // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2013. Vol. 49. No 2, pp. 258—277.

20. *Мусатова И. Н., Фокин В. А.* Методика обработки результатов сейсмозамеров при производстве массовых взрывов в карьерных условиях // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 70—74.

21. *Кабетенов Т., Юсупов Х. А., Рустемов С. Т.* Определение рациональных параметров скважинной отбойки с учетом времени действия взрывного импульса // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 75—81.

22. *Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н.* Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 30—39.

23. *Абрамов Н. Н.* Методические аспекты сейсмотомографического мониторинга нарушенности скального массива // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 126—130.

24. *Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Рублев Д. Е., Кулинич Н. А., Юшкин А. В.* О верификации кинематического выражения для волн маятникового типа по данным сейсмических измерений в условиях рудника «Таштагольский» и мраморного карьера «Искитимский» // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 3—23.

25. *Баранов Е. Г.* Короткозамедленное взрывание. — Фрунзе: Илим, 1971. — 147 с.

26. *Wayne Rogers, Arthur Pacunana, Kell Monro*. Blast Optimization of Hard Ores at Phu Kham Open Pit. The Journal of Explosives Engineering. Vol. 35, No. 4, July/August 2018, pp. 28—35.

27. *Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Климко В. К., Рублев Д. Е., Изотов А. С., Иванов А. В.* Об аналитическом описании форм поверхности подземной камеры при взрывах зарядов по данным лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 183—196.

28. *Адушкин В. В., Опарин В. Н.* От явления знакопеременной реакции горных пород на динамическое воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — ч. I. — 2012. — № 2. — С. 3—27; ч. II. — 2013. — № 2. — С. 3—46; ч. III. — 2014. — № 4. — С. 10—38. — ч. IV. — 2016. — № 1. — С. 3—49.

29. *Геомеханические* поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах: Т. 1 / Под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. — 549 с.

30. *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 // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 81—104. ГИАБ

REFERENCES

1. Efremov E. I., Petrenko V. D., Pastukhov A. I. *Prognozirovanie drobleniya gornykh massivov vzryvom* [Prediction of rock fragmentation by blasting], Kiev, Naukova Dumka, 1990, 120 p.

2. Kutuzov B. N. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot*. CH. 2. Vzryvnye raboty v gornom dele i promyshlennosti [Methods of blasting. Part 2. Blasting in mining and in the industry], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo», 2011, 512 p.

3. *Tekhnicheskie pravila vedeniya vzryvnykh rabot na dnevnoy poverkhnosti* [Technical regulations for blasting on ground surface], Moscow, Nedra, 1972, 240 p.

4. Stig O. *Olofsson Applied explosives technology for construction and mining*. APPLEX, 1990. P. 315.

5. Oparin V. N., Yushkin V. F., Porokhovsky N. N., Grishin A. N., Kulinich N. A., Rublev D. E., Yushkin A. V. Effect of large-scale blasting on spectrum of seismic waves in a stone quarry. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No 5, pp. 865—877.

6. Rossmanith H. P. The Mechanics and Physics of Electronic Blasting. ISEE: *29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*: February 2—5, 2003: Nashville, Tennessee, USA: Vol. 1, pp. 83.

7. Oparin V. N., Tanaino A. S. A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2015), http:. dx.doi.org / 10/1016 / j. jrmge. 2014. 12. 004.

8. Mosinets V. N. *Drobyashchee i seysmicheskoe deystvie vzryva v gornykh porodakh* [Crushing and seismic effects of blast in rocks], Moscow, Nedra, 1976, 271 p.

9. Explosive detonation velocity meter MicroTrap™ VOD/Data Recorder. Canada: MREL Group of Companies Limited, 2011. http://tekhobor.ru/catalogs/meashuring/mrel/MREL_Recorders_and_Accessories_List.pdf.

10. Khanukaev A. N. *Energiya voln napryazheniy pri razrushenii porod vzryvom* [Energy of stress waves in rock shattering], Moscow, Gosgortekhizdat, 1962, 200 p.

11. Rozhdestvenskiy V. N., Panzhin A. A., P'yanzin S. R., Kochnev K. A. Examination of jointing in local rock mass areas using facilities of ground-based laser scanning. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 75—78. [In Russ].

12. Nonel system description. Sweden: Dino-Nobel company, 1998-08. http://striletsa.ucoz.ru/_ld/0/5__NONEL_.pdf.

13. P'yanzin S. R., Yakovlev A. V., Panzhin A. A., Rozhdestvenskiy V. N., Kochnev K. A. Degree of jointing in local rock masses subjected to breakage. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie*. 2012, no 5, pp. 22—29. [In Russ].

14. Kurlenya M. V., Oparin V. N., Bobrov G. F., Akinin A. A., Vostrikov V. I., Yushkin V. F. Wedge effect of abutment pressure zones. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* 1995, no 4, pp. 3—11. [In Russ].

15. Oparin V. N., Yushkin V. F., Zhigalkin V. M., Simonov B. F., Arshavskiy V. V., Tapsiev A. P. Failure of one-dimensional model of block medium in long-term uniaxial compression. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2002, no 4, pp. 81—93. [In Russ].

16. Yushin V. I., Geza N. I., Yushkin V. F., Polozov S. S. Measurement of dynamic strains and true rock mass movements near explosion seat in open pit mine using seismic sensors. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2010, no 5, pp. 34—43. [In Russ].

17. Proskuryakov V. M., Blyakhman A. S. *Seysmicheskie metody issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya gornogo massiva* [Seismic methods of stress state study in rock mass], Moscow, Nedra, 1983, 192 p.

18. Yakovlev A. V., Busargina E. S., Mel'nik V. V., Zamyatin A. L. *Rayonirovanie massiva gornykh porod kar'erov OAO «Evraz KGOK» po kategoriyam vzryvaemosti* [Rock mass zoning by blastability for open pit mines of Evraz Kachkanar Mining and Processing Plant], Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2013, 30 p.

19. Adushkin V. V. Blasting-induced seismicity in the European part of Russia. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. Vol. 49. No 2, pp. 258—277.

20. Musatova I. N., Fokin V. A. Processing procedure for seismic measurements taken during large-scale production blasting in open pit mines. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 70—74. [In Russ].

21. Kabetenov T., Yusupov Kh. A., Rustemov S. T. Determination of efficient parameters for blast design with regard to action time of explosion-generated pulse. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 2, pp. 75—81. [In Russ].

22. Voznesenskiy A. S., Kutkin YA. O., Krasilov M. N. Interaction between acoustic Q-factor and strength characteristics of limestone. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 1, pp. 30—39. [In Russ].

23. Abramov N. N. Methodical aspects of seismic tomography monitoring of rock mass quality and damage. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014, no 4, pp. 126—130. [In Russ].

24. Oparin V. N., Yushkin V. F., Rublev D. E., Kulinich N. A., Yushkin A. V. Verification of kinematic expression for pendulum waves by seismic measurement data in Tashtagol mine and Iskitim marble quarry. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 2, pp. 3—23. [In Russ].

25. Baranov E. G. *Korotkozamedlennoe vzryvanie* [Short-delay blasting], Frunze, Ilim, 1971, 147 p.

26. Wayne Rogers, Arthur Pacunana, and Kell Monro. Blast Optimization of Hard Ores at Phu Kham Open Pit. *The Journal of Explosives Engineering*. 2018, Vol. 35 No. 4, July/August. pp. 28—35.

27. Oparin V.N., Yushkin V.F., Klimko V.K., Rublev D.E., Izotov A.S., Ivanov A.V. Analytical description of underground cavity surface forms in blasting by laser scanning data. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no 4, pp. 183—196. [In Russ].

28. Adushkin V.V., Oparin V.N. From alternating rock mass response to dynamic forces toward pendulum waves in high-stress geomedia. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* Part I. 2012, no 2, pp. 3—27; Part II. 2013, no 2, pp. 3—46; Part III. 2014, no 4, pp. 10—38. Part IV. 2016, no 1, pp. 3—49. [In Russ].

29. Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh. T. 1. Pod red. N.N. Mel'nikova [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical research into initiation and growth focal zones of catastrophes in mine-technical and natural systems. Vol. 1. Mel'nikov N.N.], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2018, 549 p.

30. Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N., Smolyanitskiy B.N. Application of energy criteria of volumetric rock destruction in technological improvement of rotary–percussive drilling. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2017, no 6, pp. 81—104. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Опарин Виктор Николаевич[1] — д-р физ.-мат. наук, профессор,
заведующий отделом экспериментальной геомеханики,
член-корреспондент РАН, e-mail: oparin@misd.ru,
Юшкин Владимир Федорович[1] — д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: L14@ngs.ru,
Гришин Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: gan66@mail.ru,
Сибирский государственный университет путей сообщения,
Богатырев Александр Владимирович — канд. техн. наук,
заместитель технического директора по БВР, e-mail: bogatirev@bach.kru.ru,
Филиал «Бачатский угольный разрез» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»,
Пороховский Н.Н. — технический директор, e-mail: porohovskiy@nkuoao.ru,
Искитимский карьер ОАО «Новосибирское карьероуправление»,
Рублев Денис Евгеньевич[1] — инженер, магистрант, e-mail: denmiir@211.ru,
[1] ИГД СО РАН.
Для контактов: Юшкин В.Ф., e-mail: L14@ngs.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Oparin[1], Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Head of Department,
Corresponding Member of Russian Academy of Sciences,
e-mail: oparin@misd.ru,
V.F. Yushkin[1], Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: L14@ngs.ru,
A.N. Grishin, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: gan66@mail.ru,
Siberian Transport University, 630049, Novosibirsk, Russia,
A.V. Bogatyrev, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Technical Director,
Branch «Bachat coal mine» JSC «UK «Kuzbassrazrezugol»,
Bachatsky, Russia, e-mail: bogatirev@bach.kru.ru,
N.N. Porokhovskiy, Technical Director, e-mail: porohovskiy@nkuoao.ru,
Iskitimsky quarry, JSC «Novosibirsk Quarry Administration», Novosibirsk, Russia,
D.E. Rublev[1], Engineer, Master's Degree Student, e-mail: denmiir@211.ru,
[1] Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia
Corresponding author: V.F. Yushkin, e-mail: L14@ngs.ru.