

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.33.013.3

О ВЛИЯНИИ МАССОВОГО ВЗРЫВА В КАРЬЕРЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КАМНЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

**В. Н. Опарин¹, В. Ф. Юшкин¹, Н. Н. Пороховский²,
А. Н. Гришин³, Н. А. Кулинич¹, Д. Е. Рублев¹, А. В. Юшкин¹**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: 114@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия,

²Искитимский карьер ОАО “Новосибирское карьероуправление”,
E-mail: porohovskiy@nkuoao.ru, Комсомольский проспект, 22, 630004, г. Новосибирск, Россия,

³Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
E-mail: gan66@mail.ru, ул. Д. Ковальчук, 191, 630049, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены особенности взаимодействия групп зарядов ВВ вблизи свободной поверхности обнажения массива горной породы вдоль борта карьера. Спектральный анализ сейсмических колебаний при воздействии взрыва показал, что частоты максимумов спектральной плотности сейсмической волны по мере распространения ее в массиве определяются формированием низкочастотных компонентов канонического вида в результате последовательного срабатывания зарядов и обусловлены блочно-иерархическим строением разрушаемых массивов горных пород.

Карьер, блочно-иерархическое строение пород, известняк, массовый взрыв, сейсмическая волна, спектральный анализ, гранулометрический состав

ВВЕДЕНИЕ

Роль и удельный вес применения взрывов в осуществлении технологических процессов в горном деле, гражданском строительстве и ряде других направлений промышленности трудно переоценить, а нередко им нет альтернативы. К настоящему времени накоплен большой по объему материал экспериментальных и теоретических исследований по взрывным процессам в геосредах, отраженный во многих обобщающих справочных изданиях, книгах и монографиях [1 – 7].

Как показал опыт проводимых исследований, эффективность применения массовых взрывов в горном деле при разработке месторождений полезных ископаемых во многом определяется адекватностью теоретических представлений о механизмах трансформации высвобождаемой энергии от применяемых взрывчатых веществ (ВВ) в механическую энергию разрушения горных пород с сопутствующим излучением сейсмических волн разного типа.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта ОНЗ РАН-3.1.

На протяжении длительного периода времени для описания таких процессов активно разрабатывались “континуальные” модели динамической теории упругости и образования трещин [4–6]. Здесь структурное строение реальных массивов горных пород и редко уровень их напряженного состояния если и учитывались, то в основном косвенно — через значения используемых в описании “эффективных” механических модулей геосреды.

Однако начиная с середины 70-х годов минувшего века с активным экспериментальным изучением влияния структурного фактора массивов горных пород на геомеханические процессы вокруг подземных выработок разного назначения и способов их проходки стали множиться данные, свидетельствующие о ключевой роли этого фактора в развитии особенностей квазистатической и динамической реакции горных пород на образующиеся подземные полости. С учетом обнаруженного эффекта аномально высокой тензочувствительности геофизических полей в зонах сопряжения (“контактов”) структурных блоков геосреды разного масштабного уровня [8, 9] появились и методологические предпосылки для количественного определения линейных размеров структурных отдельностей массивов горных пород.

Так, отмеченная связь явилась основополагающей для развития спектроскопического направления в скважинной геофизической дефектоскопии массивов горных пород [10], впервые позволившей количественно определять не только размеры их структурных элементов, но и следить за динамикой дробления и кластеризации геоблоков [11], в значительной мере способствовав открытию явления знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия [12, 13], а затем и широкого скоростного диапазона волн маятникового типа [14–17].

Отмеченный период времени примечателен тем, что академиком М. А. Садовским была выдвинута концепция о блочно-иерархическом строении горных пород и их массивов [18, 19], давшая мощный импульс поиску новых методов количественного описания структуры геосред, удобных для анализа нелинейных квазистатических и динамических процессов, в том числе и в горном породоведении для технологических целей [20]. Достаточно подробный аналитический обзор эволюции современных научных взглядов на массивы горных пород во взаимодействии с техногенной деятельностью человека отражен в обобщающих работах [21–25].

В недавней публикации [26] к одной из актуальных проблем нелинейной геомеханики отнесена *“способность управлять дезинтеграционными процессами в механически напряженных образцах горных пород внешними электромагнитными, акустическими или комбинированными (акустоэлектромагнитными) воздействиями в виде волновых пакетов, препарированных по амплитудно-периодному спектру и скважности”*. Открытие волн маятникового типа и эффекта аномально низкого трения в блочных средах [14, 27] позволяет эту формулировку существенно расширить, представив ее с добавлением: *“... или комбинированными (акустоэлектромагнитными и импульсными механическими) воздействиями ...”*.

В фундаментальной работе [25] содержащаяся в приведенной формулировке идея оценивается как конструктивная и *“для управления напряженно-деформированным состоянием в местах повышенной концентрации напряжений внешними физическими полями на принципе обратной связи: использование амплитудно-периодного спектра и скважности эмиссионных физических полей из формирующихся очаговых зон будущих катастрофических событий, но уже в активном варианте — по структуре внешних воздействующих физических полей на эти очаговые зоны с целью управления релаксационными процессами”*. По существу, в этой же статье приведены не только концептуальные и методологические предпосылки для решения сформулированной проблемы, но и достаточно полный набор расчетных формул для отмеченных целей.

Производство массовых взрывов при добыче полезных ископаемых в напряженных массивах горных пород, очевидно, можно также рассматривать как частный случай формирования некоторых “очаговых зон” их разрушения (необходимых размеров и требуемого гранулометрического состава). Поэтому достижение проектных целей и рациональная трата энергии применяемых ВВ с необходимостью должны учитывать как исходные физико-механические свойства разрушаемых (в заданных кондициях по гранулометрии) объемов горных пород, так и конкретно исходные структурные особенности в количественном описании [28].

Отмечая необходимый набор расчетных формул для отмеченных целей, достаточно полно приведенных в [25] применительно к очаговым зонам разрушения напряженных массивов горных пород блочно-иерархического строения, особо выделим из них ту, что непосредственно касается оптимального выбора ступеней замедления производимых массовых взрывов.

Она получена в работах [16, 17, 27], связанных с анализом механизма возникновения волн маятникового типа и открытием эффекта аномально низкого трения в геосредах со структурой. Эта формула касается условия проявления эффекта аномально низкого трения между структурными элементами блочной среды, находящихся в “стесненных” условиях и испытывающих совместное действие ортогонально направленных между собой импульсных силовых воздействий (в “одномерном” представлении), по интервалам задержки между последними [27]:

$$\delta t_i = (\sqrt{2})^i \delta t_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

$$\delta t_0 = \frac{2\Delta \cdot \chi}{U_p}, \quad \chi = \sqrt{2}^9 \approx 22.63.$$

Здесь Δ — характерный линейный размер “работающих” блоков; U_p — скорость распространения продольной волны в геоматериале структурного блока Δ , известным образом определяемая через механические модули геосреды (плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

Формула (1), как оказалось [17], непосредственно связана и со спектральным составом упругих волновых пакетов для формируемых при взрыве (или механических воздействиях) волн маятникового типа. Спектральный состав по частотам этой группы волн в свою очередь связан с линейными размерами их вещественных носителей — структурных блоков (или неоднородностей), кластерно представляющих разрушаемый объем породного массива или “очаговой зоны”:

$$f_i = (\sqrt{2})^i f_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2)$$

$$f_0 = U_p / 2\Delta.$$

Формула (2) и векторные ее аналоги получены эмпирически при анализе амплитудно-частотного спектра сейсмических волн от технологических взрывов при отработке медно-никелевых руд Талнахско-Октябрьского месторождения [17], а также при физическом моделировании механических условий возникновения волн маятникового типа [16].

Как отмечено в работе [26], если воспользоваться достаточно универсальным законом “квантования” структурных отдельностей горных пород и геоматериалов, приведенным в [21]:

$$\Delta_j = \Delta_0 (\sqrt{2})^j, \quad \Delta_0 \approx 2.5 \cdot 10^6 \text{ м}, \quad (3)$$

$i \in N$ — целые числа (порядок для размеров отдельностей меньше Δ_0 — с отрицательным знаком),

то подстановка вместо Δ в формулу (2) для базовой частоты f_0 канонических размеров Δ_j из (3) дает также выражение, аналогичное для f_i из (2).

Отмеченное обстоятельство весьма важно, поскольку позволяет применять спектроскопический подход к анализу взаимосвязи между формой упругих волновых пакетов (сейсмических волн) и структурным строением подлежащих разрушению горных пород с позиций технологической оптимизации производства массовых взрывов.

С учетом отмеченного, в развитие экспериментальных исследований [17] опишем результаты спектрального анализа сейсмических записей от массового взрыва в массиве вдоль борта карьера “Искитимский” по добыче строительного камня (Новосибирская область).

Условия взрывания зарядов ВВ при отработке карьера влияют не только на эффективность дробления пород в заданном объеме массива, но и на нарушение естественной сплошности массива вне проектного контура. Поэтому спектральный состав упругих колебаний (сейсмических волн) в ближней к месту взрыва зоне и скоростные характеристики распространения последних вдоль свободных обнаженных пород представляют существенный интерес при рассмотрении устойчивости бортов карьера при действии динамических нагрузок.

Практика ведения взрывных работ показывает [29], что потенциальные резервы при взрывании пород с помощью неэлектрических систем инициирования (НСИ) выявляются преимущественно при оптимизации соотношений между величинами зарядов, глубиной взрывааемых скважин и расстояниями между ними, обеспечивающих наилучшее использование энергии взрыва на дробление в конкретных горнотехнических условиях, а также при одновременном взрывании скважинных зарядов (в отличие от взрывания при помощи детонирующего шнура, пиротехнических реле и электрических детонаторов, когда инициирование зарядов происходит группами по несколько скважин). При этом стоит задача определения оптимальных интервалов замедления между скважинами в ряду и между рядами скважин.

Несмотря на очевидный прогресс, который наступил при переходе на использование НСИ, данная система инициирования не решает, в частности, проблему взрывания рассредоточенных скважинных зарядов с воздушными промежутками ввиду отклонения фактического времени взрывания от номинального, установленного производителем. Между тем необходимость улучшения качества дробления разного типа пород при взрыве требует более общего подхода к решению этой задачи и приближения гранулометрического состава разрушаемой массы к товарным стандартам (не только сокращения объема негабарита) с целью снижения производственных затрат на окончательную переработку сырья в заводских условиях, что является актуальной проблемой горно-перерабатывающего предприятия. Однако до настоящего времени взрывной процесс в напряженных геосредах блочно-иерархического строения исследован недостаточно полно.

Обычно действие взрыва рассматривают в “бесконечной” однородной среде в предположении сферической симметрии. Для получения более детальной натурной информации о динамико-кинематических характеристиках распространения сейсмической волны в структурированных геосредах необходимо учитывать как влияние энергии взрыва на зону разрушения, так и наличие отдельностей (блоков) горных пород. Ниже приводятся результаты спектрального анализа сейсмической волны взрыва, генерируемой скважинными зарядами в массиве горных пород с целью проверки наличия связей типа (2) и (3).

ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРА “ИСКИТИМСКИЙ”

Геологическое строение территории правобережья р. Обь на юге Западной Сибири обусловлено длительным геологическим периодом разрушения горной системы. Район г. Искитим Новосибирской области характеризуется залеганием плотных горных пород вблизи земной поверхности. Его особенностью является наличие полезных ископаемых магматического и осадочно-метаморфического происхождения, формирующих месторождения антрацитов и мине-

ральных строительных материалов: известняка, мрамора, цементного сырья. Распространены и другие полезные ископаемые: граниты блочные, облицовочные камни, керамзит, базальты, известняки строительные, глины тугоплавкие, суглинки кирпичные, пески и др.

Шипуновское месторождение известняков (рис. 1а) расположено в пределах Искитимского административного района Новосибирской области в 6 км юго-восточнее г. Искитим и разрабатывается с 1939 г. В северной части находится мраморный карьер и основные водные артерии — р. Бердь и ее левый приток р. Шипуника. С запада примыкает 2-е Шипуновское месторождение известняков. Морфология рельефа представляет собой всхолмленную равнину с отметками от +65 до +150 м, глубоко изрезанную современной гидросетью [30].

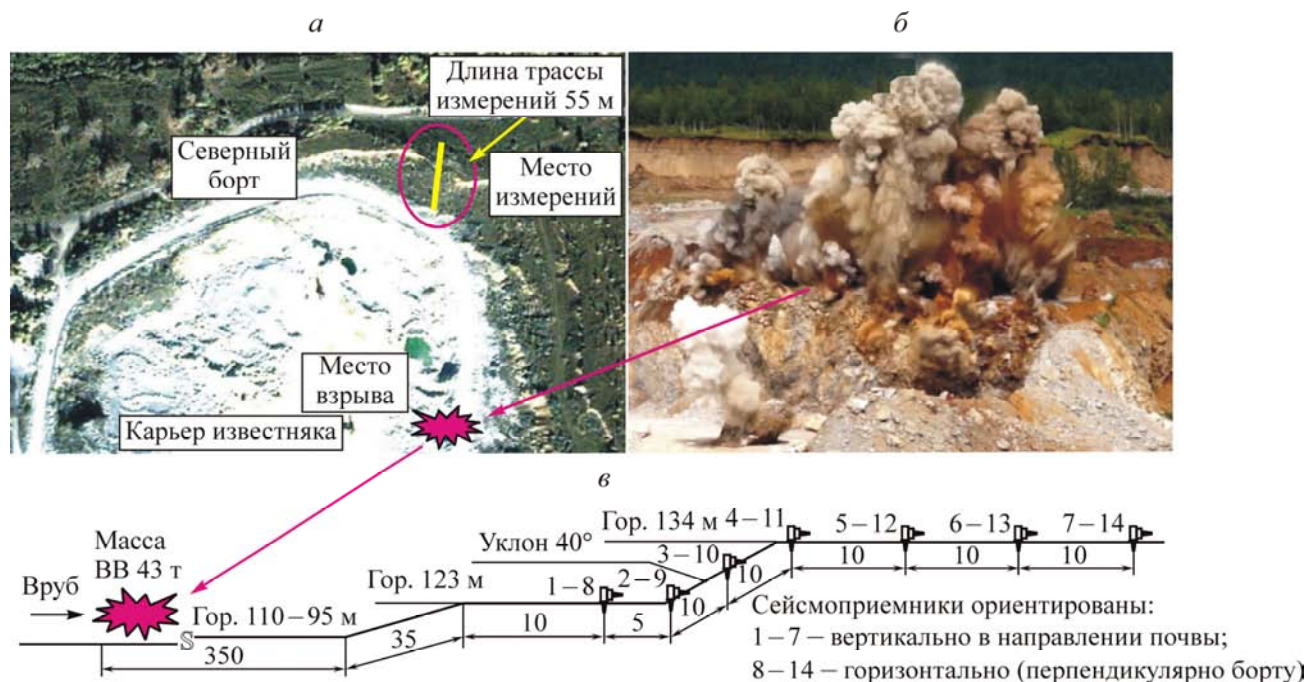


Рис. 1. План участка Искитимского карьера известняков с указанием места проведения массового взрыва (а), внешний вид взрыва (б) и схема измерений сейсмической волны от взрыва с расстановкой сейсмоприемников по откосу и верхнему уступу борта карьера (в)

Месторождение разведано до горизонта +40 м и располагается на площади 355,7 тыс. м². Вскрышные горизонты расположены на отметках +125, +130 м, добычные — на отметках +125, 110, 95, 80, 65 и 50 м. Продуктивная толща сложена достаточно однородными по физико-механическим свойствам известняками с крутым моноклинальным падением, имеющим различную степень закарстованности: до глубины 6 м — 14,8 %, ниже — 5 %. Кровля продуктивной толщи имеет крайне неровную поверхность с карстовыми воронками и западинами. Карсты заполнены глиной и разновидностями суглинков. На верхних горизонтах известняки относятся к среднетрещиноватым и среднекрупноблочным. Нижние горизонты известняка малотрещиноватые, крупноблочные.

Известняки по внешнему виду массивные, крепкие, с неровным изломом, мелкозернистые, окраска изменчива — от темно-серой до светло-серой, почти белой; в северо-западной части месторождения встречаются мраморизованные известняки розовато-серые, мелкозернистые, массивные, изредка бело-серые. В восточной части известняк темно-серый, почти черный, тонкокристаллический, участками мелкокристаллической текстуры, нарезка чешуйчатая из-за сложного расщепления. На участках скрытокристаллического строения наблюдаются редкие прожилки белого крупнокристаллического кальцита.

Тектонические структуры известняковых толщ изучены еще недостаточно. Разрывные нарушения в известняках распространены достаточно широко и разнообразны по форме и амплитуде. Стратиграфическая амплитуда этих нарушений изменяется от 100 до 400 м. Им соответствуют широкие (в десятки метров) зоны дробления и малоамплитудных дислокаций. Средне- и малоамплитудные разрывы в известняковой толще представлены различными морфологическими типами: преимущественно взбросами и надвигами, реже — сбросами и послойными перемещениями, проявляющимися в мраморизованных прослоях. Отмечаются карстовые проявления, главным образом в приповерхностной части месторождения на контактах с осадочными грунтами.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

В качестве строительного камня в карьере добывается известняк. Исследования качества известняков Шипуновского месторождения велись в разрезе требований промышленности, предъявляемых к сырью для получения щебня в тяжелые бетоны марок 200 и 400 с морозостойкостью марки Мрз-50, строительной извести 1 сорта, а также щебня для покрытия автомобильных дорог, отвечающего требованиям действующих ГОСТов: 26333-91, 8267-93, 8736-93, 25607-94. Физико-механические свойства известняка характеризуются показателями, приведенными в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Показатели физико-механических свойств известняка

| Показатель | Значение | Среднее |
|---|--------------|---------|
| Плотность, кг/м ³ | 2680 – 2820 | 2740 |
| Объемный вес, кг/м ³ | 2640 – 2820 | 2700 |
| Пористость, % | 0.3 – 3.2 | 1.06 |
| Водопоглощение, % | 0.1 – 0.57 | 0.24 |
| Предел прочности при сжатии в воздушно-сухом состоянии, МПа | 6.22 – 13.24 | — |
| Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии, МПа | 6.08 – 12.21 | — |

Примечание. Скорость продольной волны в образце известняка принята 4000 м/с.

Гранулометрический состав при добыче строительного камня характеризует размеры кусков пород по крупности. Задачей взрывных работ является отделение строительного камня от массива пород естественной блочности с разрушением его до требуемых размеров, что повышает эффективность дальнейшей переработки в технологических циклах дробления.

При взрыве образуются совокупности кусков породы, которые имеют различную форму и обладают значительной вариацией по линейным и угловым размерам. Этому способствуют полигональные системы трещин, формирующиеся при петрогенезе за счет запасенной внутренней энергии. Осложняющее влияние оказывают напряженное состояние, тектоническая обстановка и подвижность внутренних слоев, наличие геологических нарушений, анизотропия и неоднородность свойств горного массива в целом. Влияют также климатические факторы окружающей среды, существенно проявляющиеся в приповерхностных слоях.

Характер полигональной трещиноватости определяется составом пород, первичной формой их залегания, развитием петрогенеза (рис. 2а). Для полигональных систем трещин характерны следующие особенности:

- преобладание многоугольных блоков (5, 6 и более углов);
- преобладающее наличие узлов сети с тремя выходящими из них “лучами” трещин;

- сравнительная постоянность периметров ячеек трещинной сети;
- доминирование сопряжений трещин под углами, отличными от прямых;
- раскрытость трещин имеет положительную корреляцию с их длиной.

а



б



в

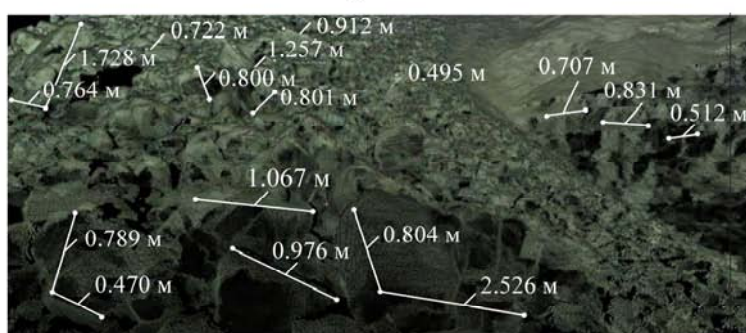


Рис. 2. Состояние массива пород в карьере до (*а* — фрагмент фотореалистичной модели подготовленного к взрыву борта) и после массового взрыва борта (*б* — фотография, *в* — фотореалистичная модель после сканирования взорванной массы с выделением цепочки крупногабаритных блоков линейным размером более 0.7 м)

Использование сейсмических данных для контроля действия взрыва и лазерного сканирования для измерений кусковатости взорванной массы позволяет проводить комплексный количественный анализ характера разрушения пород.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Для определения динамико-кинематических характеристик распространения сейсмического волнового пакета от массового взрыва и оценки влияния работы групп скважинных зарядов ВВ вблизи свободной поверхности горных пород на его формирование в массиве выбран уступ борта карьера на отметках гор. +123 ÷ 134 м (см. рис. 1*а, б*), где нижний горизонт представлен известняками и блочными гранитами, выше расположен осадочный массив из суглинистых грунтов.

Запись сейсмической волны от взрыва проводилась 14-канальной сейсмостанцией “Лакколит 24-М” [31] с использованием сейсмоприемников GS20-DX (см. рис. 1*в*), установленных попарно в грунт с интервалом 10 м и ориентацией оси чувствительности сейсмоприемников 1–7 вертикально к почве, а для сейсмоприемников 8–14 — горизонтально (перпендикулярно борту для каждой пары). Пара сейсмоприемников 1–8 закреплена с помощью алебастра в скальном массиве. Длина измерительной трассы составила 55 м. Принятая ориентация сейсмоприемников позволяла регистрировать вертикальную и горизонтальную компоненту сейсмической волны от массового взрыва, который проведен на расстоянии ~400 м от борта карьера. Время задержки сигнала на запись в режиме “по обнаружению” составляло 8 мс.

ХАРАКТЕРИСТИКА МАССОВОГО ВЗРЫВА И ЕГО РАЗРУШАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ

Регистрация сейсмической волны от массового взрыва в массиве известняка выполнялась при взрывании уступа восточного борта карьера, как показано на рис. 1в.

Цель массового взрыва — дробление скальных пород. Место производства взрыва — горизонт +95 м по восточному борту карьера, средняя высота уступа 15.7 м.

Характеристика взрываемых горных пород — известняк, категория по СНиП-8, коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова 10, объем взрываемой породы 40 500 м³.

Параметры взрываемых скважин: диаметр 165 мм, угол и направление наклона к горизонту 90°, средняя глубина 17.2 м, общее количество 107. Заряды рассредоточены по глубине скважин с использованием бурового шлама в качестве забоечного материала. Расстояние между частями заряда в скважине 1 м. Расстояние между скважинами в ряду и между рядами соответственно 4.8 и 4.4 м, переbur по уступу 1.0–1.5 м. Количество скважин по рядам варьирует от 7 до 9, а для взрывания их объединяли в группы по 5–9 скважин.

Расчетное количество ВВ на массовый взрыв 43 т. Заряды по скважинам распределены одинаково. Система инициирования НСИ с устройствами Искра-П-25 и Искра-С-500 [32]. Взрыв зарядов выполнен со следующими интервалами замедления: для поверхностных между скважинами в ряду и между рядами скважин 25 мс, для скважинных 500 мс. Место начального подрыва зарядов расположено со стороны, противоположной месту расстановки сейсмоприемников (см. рис. 1в).

Взрыв нарушает исходное состояние сплошности массива, при этом породы разрушенного участка характеризуются средними размерами кусков взорванной массы и углами взаимного расположения граней (см. рис. 2б, в). Во взорванной массе наблюдаются блоки негабаритных размеров с явным преобладанием сложной полигональной формы с числом граней 8–10 и более. Это усложняет переработку сырья до требуемых по ГОСТу кондиций. Поскольку технологически взрыв должен минимизировать дальнейшую переработку сырья, то важны данные о гранулометрическом составе взорванной массы горных пород. Гранулометрический состав определен по данным лазерного сканирования взорванного уступа с помощью измерений углов взаимного наклона граней и линейных размеров характерных блоков пород (рис. 3), выбранных для оценки интенсивности воздействия взрыва на состав разрушенной породы и изменение структуры трещин борта карьера.

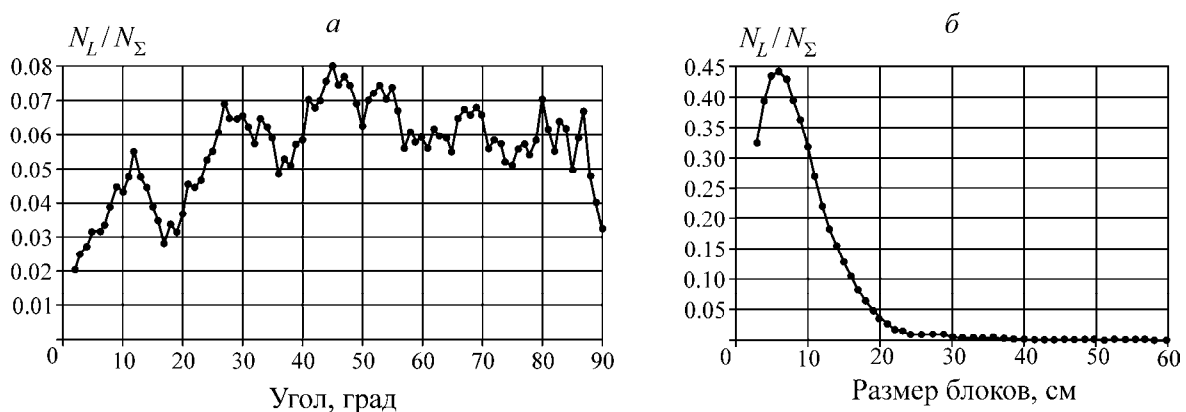


Рис. 3. Распределение углов наклона граней (а) и линейных размеров (б) блоков в массиве, сформировавшихся после массового взрыва борта, по данным лазерного сканирования: N_{Σ} — общее количество измеренных блоков; N_L — количество блоков, имеющее данный угол между боковыми гранями (а) или линейный размер (б)

Как показали наблюдения, наибольшее влияние взрыв оказывает на формирование сети трещин в краевой части массива по борту карьера за счет смещения блоков вдоль уже существующих систем трещин, а затем вдоль вновь образующихся в массиве (см. рис. 2а). Факторы, приводящие к появлению различно ориентированных и кажущихся хаотичными систем трещин, изучены пока слабо.

Анализ данных по размерам блоков, приведенных на рис. 3б, свидетельствует о том, что использование линейной шкалы представления по гранулометрическому составу взорванной массы пород слабо информативно, в том числе и с позиций выраженности на них блоков негабаритных размеров. В дальнейших исследованиях, по мере набора достаточного объема соответствующей натурной информации, предполагается использование более естественной для горного породоведения канонической шкалы структурно-иерархических представлений [20, 30], где практически равноправно могут быть представлены линейные размеры структурных элементов горных пород любого иерархического уровня (в том числе “переизмельченные” фракции и область негабаритов).

На механическое состояние породного массива после взрыва существенно влияет степень прерывистости (или топологической связности) сети трещин, которая зависит от исходных деформационно-прочностных свойств горных пород, а также от уровня концентрации разнотипных минералов, структурных элементов и других включений в составе пород. Эти факторы присущи практически любым горным породам.

Как видно на рис. 3, углы наклона граней (а) и линейные размеры (б) заметно разнятся по своим значениям для разных совокупностей блоков, сформировавшихся в массиве после взрыва.

ФОРМИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ МАССОВОГО ВЗРЫВА В КАРЬЕРЕ

Массовый взрыв проводился в вертикально расположенных рядах скважин согласно схеме, показанной на рис. 4а, где заряды 107 скважин, объединенных в пятнадцать групп, инициированы с интервалами замедления 25 мс в каждой группе. Инициирование взрывания скважин каждой из групп обеспечивается с помощью поверхностных детонаторов НСИ с номинальным временем замедления 25 мс и внутрискважинных детонаторов с номинальным временем замедления 500 мс.

На рис. 4б приведен фрагмент схемы монтажа детонаторов НСИ, включающий первую от откоса уступа скважину, взрываемую с номинальным временем замедления 500 мс, и скважину во втором ряду, взрываемую с суммарным номинальным временем замедления поверхностного и скважинного детонаторов 525 мс. Учитывая, что погрешность взрывания детонаторов составляет около 10%, фактическое время срабатывания отдельных детонаторов в сторону замедления составит: для скважин первой группы до 550 мс, для скважин второй группы до 577.5 мс, т. е. время наложения при подрыве указанных скважин может достигать 52.5 мс.

Для визуального анализа подрыва групп скважинных зарядов по интервалам замедления выполнена скоростная фотосъемка с частотой 50 кадров в секунду.

Из отмеченного следует, что непоследовательное взрывание зарядов возможно не только между их соседними группами в рядах скважин, но и между первой и третьей группами. Такое несоответствие проявляется как при взрыве зарядов отдельных скважин, так и групп скважинных зарядов. Об этом свидетельствует покадровый просмотр скоростной видеозаписи взрыва (рис. 5, где последовательно показаны взрывы первой и второй групп скважинных зарядов).

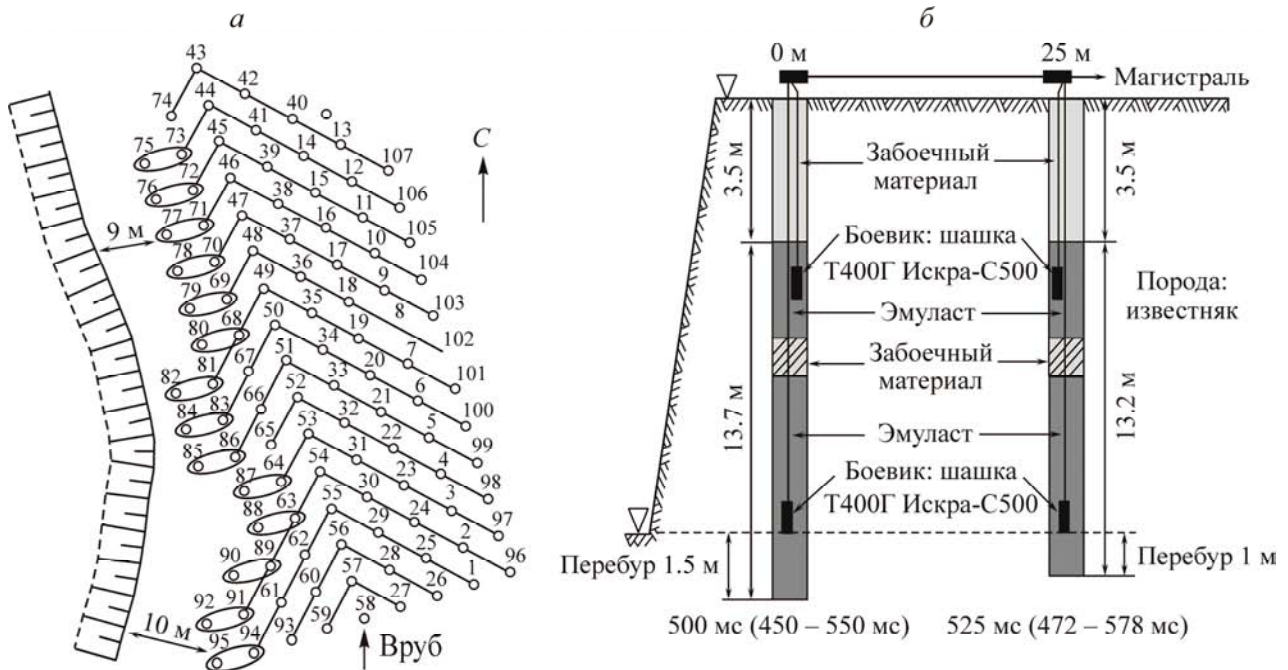


Рис. 4. Схема выполнения буровзрывных работ (а) и структура залегания пород уступа, конструкция заряда в скважине и фрагмент монтажа неэлектрической системы инициирования (б). В круглых скобках указаны интервалы замедления с учетом погрешности



Рис. 5. Последовательные взрывы первой (а) и второй (б) групп скважинных зарядов, зафиксированные с помощью скоростной фотосъемки с частотой 50 кадров в секунду. Интервал между событиями на видеокдрах составляет 20 мс, интервал между подрывом первого скважинного детонатора и взрывом первой группы скважин 500 мс

Это обстоятельство принципиальной значимости и связано с необходимостью существенного совершенствования и развития технологий ведения буровзрывных работ с опорой на уже достигнутые технические результаты по системам управления процессами инициирования и взрывания с адаптивными к структуре породного массива ступенями замедления как между отдельными зарядами, так и их группами. Ключевые задачи здесь связаны и со значительной (менее 5 %) точностью времен срабатывания отдельных детонаторов.

Как известно, в проектных расчетах при ведении буровзрывных работ обычно используется эмпирическая в своей основе формула

$$t = AW, \tag{4}$$

где A — безразмерный коэффициент, зависящий от крепости породы и означающий удельное замедление на 1 м расстояния между соседними зарядами; W — линия наименьшего сопротивления (ЛНС).

Для обеспечения каноничности структуры ступеней замедления по типу (1) необходимо обеспечить их возможное расхождение менее 5%. Это следует из точности иерархического представления линейных размеров структурных отдельностей горных пород в канонической шкале [20, 30].

Анализ сейсмограммы по вступлениям упругой волны, формирующейся при взрывах отдельных групп скважинных зарядов, подтверждает отклонение времен инициирования зарядов от номинальных значений. На рис. 6 показана запись скорости смещений пород при действии сейсмозрывной волны по каналу 1 на удалении 400 м от места взрыва (см. рис. 1в). По оси ординат на записи указана амплитуда вертикальной скорости смещений пород, по абсциссе — время от момента запуска сейсмостанции на запись сигнала. По сейсмограмме видно, что вступления упругих волн при срабатывании соответствующих групп скважинных зарядов не всегда совпадают с соответствующими паспортными интервалами замедления.

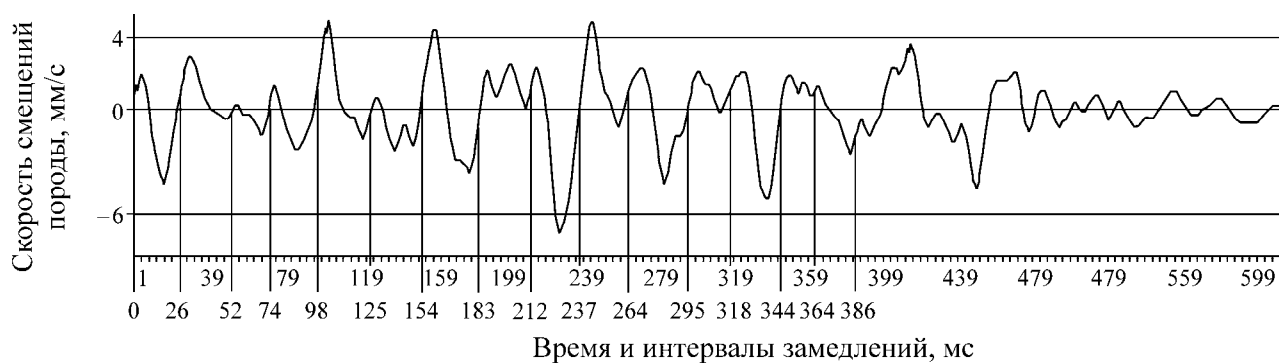


Рис. 6. Запись исходного упругого волнового пакета от взрыва сейсмоприемником 1 на удалении 400 м от места взрыва

При взрыве заряда в массиве известняка волна давления формирует зону дробления вблизи взрываемых групп скважин, где происходит разрушение горных пород. По мере ослабления волны давления разрушение пород практически прекращается и в массиве формируется объемная упругая волна. Если исходить из минимально возможного времени существования волны давления (времени разложения заряда ~ 14-метрового цилиндрического заряда эмулата), то оно составляет ~ 3 мс. За это время фронт сейсмической волны от взрыва распространяется на расстояние до 12 м (при скорости продольной волны ~ 4 км/с). С увеличением расстояния в массиве действие последней изменяется под влиянием геометрического расхождения и интерференции с другими типами упругих волн в структуре горного массива.

Зная интервалы замедления, на сейсмической записи можно выделить вступления упругой волны от взрыва зарядов для всех групп скважин, так как сейсмоприемник 1 находится в зоне “прямого действия” от взрываемых скважин. Согласно сейсмограмме рис. 6, на момент вступления упругих колебаний от взрыва зарядов группы скважин последующих интервалов замедления скорость колебаний пород от взрыва зарядов предыдущего интервала не успевает снизиться до нуля, хотя и испытывает значительное затухание. Таким образом, породный массив при взрывании с номинальным замедлением 25 мс не успевает “успокоиться” и сейсмическая волна от предыдущего взрывного воздействия накладывается на сейсмическую волну от взрыва следующей группы.

Нижеприведенный анализ выполнен для всех записанных колебаний. Группирование скважин по интервалам замедления, проектные и фактические интервалы замедления по сейсмограмме при взрыве скважинных зарядов приведены в табл. 2, где указан порядковый номер группы, число скважин в группе, фактическое время замедления инициирования зарядов и интервалы замедления для каждой из групп, определенные по сейсмограмме (см. рис. 6).

ТАБЛИЦА 2. Группирование скважин, проектные и фактические (по сейсмограмме) интервалы замедлений при взрыве

| Порядковый номер группы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Количество скважин в группе | 1 | 5 | 6 | 7 | 9 | 7 | 6 | 8 | 8 | 9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| Время замедления по проекту, мс | | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 375 |
| Время замедления по вступлениям волны на сейсмограмме, мс | | 26 | 52 | 74 | 98 | 125 | 154 | 183 | 212 | 237 | 264 | 295 | 318 | 344 | 364 | 386 |
| Интервал замедления по сейсмограмме, мс | | 26 | 25 | 20 | 26 | 28 | 29 | 29 | 29 | 25 | 27 | 31 | 24 | 25 | 20 | 22 |

При взрыве зарядов первых двух групп скважин, последовавших с интервалом замедления 26 мс, четко просматривается распространение сейсмической волны с двумя максимумами первых полупериодов на каждом интервале. При этом соответствующий полупериод волны 2-го интервала по амплитуде превышает полупериод волны 1-го интервала, так как мощность заряда в группе 2 (количество взрывааемых скважин) больше, чем в группе 1. При взрыве 3-й и 4-й групп скважин фактические вступления упругой волны по сейсмограмме выделяются с интервалами замедления 26 и 22 мс, а соответствующие первые полупериоды волны взрыва существенно снижаются по амплитуде.

При взрыве зарядов 5-й группы скважин с фактическим интервалом замедления 24 мс полупериод сейсмической волны от взрыва возрастает, превышая по амплитуде максимум сейсмической волны при взрыве 2-й группы. Амплитуда полупериода сейсмической волны при взрыве зарядов 6-й группы скважин несколько меньше максимума амплитуды 4-й группы, при этом фактический интервал замедления по сейсмограмме составляет 27 мс. Взрывы зарядов 7, 8 и 9-й групп происходят с замедлением 29 мс. Первый полупериод сейсмической волны от взрыва 7-й группы по амплитуде приближается к максимуму волны при взрыве 5-й группы. Соответствующие полупериоды волны взрыва 8-й и 9-й групп несколько превосходят по амплитуде максимум волны 4-й группы, не превышая максимум волны 2-й группы. На интервале замедления зарядов 9-й группы наблюдается общий для всех взорванных зарядов минимум сейсмозрывной волны по амплитуде.

Взрыв заряда 10-й группы происходит с замедлением 25 мс, при этом первый полупериод волны по амплитуде приближается к максимуму при взрыве зарядов 5-й и 7-й групп. Взрывы зарядов групп с 11-й по 14-ю происходят с замедлениями 27, 31, 23 и 26 мс; здесь амплитуда первого полупериода волны каждого интервала приближается к максимуму при взрыве зарядов 2-й группы, не превышая его по абсолютному значению. Взрывы зарядов 15-й и 16-й групп происходят с замедлениями 20 и 22 мс соответственно, здесь полупериоды сейсмической волны на каждом интервале последовательно снижаются по амплитуде.

Таким образом, при сравнении сейсмической записи взрыва на интервалах замедления для одинаковых по мощности зарядов фактически отмечаются различия по амплитуде скорости смещений пород. Последняя зависит не только от мощности взрывааемых зарядов соответствующих групп скважин, но и от структурного строения пород в местах взрыва.

По результатам осмотра взорванной массы в зоне дробления отмечены участки как повышенного разлета осколков породы от взрыва ряда групп скважин, так и незначительного или полного отсутствия разлета кусков породы от взрыва отдельных скважин. Это свидетельствует о недостаточном соответствии применяемых параметров буровзрывных работ (БВР) реальным горно-геологическим условиям, влияющим как на фактические интервалы замедления, так и проектную величину забойки скважин. Повышенный разлет кусков взрывааемых пород свидетельствует о недостаточно рациональном распределении кинетической энергии взрыва в массиве.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ МАССОВОГО ВЗРЫВА

Сейсмическая волна от взрыва формируется в результате действия давления образуемых газов и возникновения волны сжатия в очаге взрыва скважинных зарядов, вызывая разрушения пород на интервалах между рядами смежных скважин и последующим переходом волны сжатия в упругие колебания в массиве по мере распространения образовавшихся сейсмических волн в массиве.

Упругие колебания частиц горных пород под воздействием распространяющихся сейсмических волн от взрывов представляют собой обычно нестационарный колебательный процесс, имеющий (теоретически) сплошной спектр с преобладанием отдельных периодов. Спектр таких колебаний можно получить с помощью преобразований Фурье [33]. При анализе упругих колебаний в горных породах, возбуждаемых взрывом, следует учитывать, что аналитическая функция, описывающая такие колебания, существует в конечном интервале времени и главная часть ее спектра лежит в ограниченной области частот ($0, \omega$). Поэтому интегрирование спектра можно выполнять от момента начала колебаний до их затухания в области частот от 0 до ω , где ω — максимальная круговая частота, выделяемая в рассматриваемом спектре. Практически по записи сейсмозврывной волны устанавливают значения ее таблично-числовой функции в соответствии с выбранным интервалом дискретизации, на основе которой строят затем амплитудные и фазовые спектры.

Для определения спектрального состава сейсмического волнового пакета от взрыва в качестве исходной функции принята натурная запись скорости сейсмосмещений в породном массиве при массовом взрыве групп скважинных зарядов (см. рис. 6). Считывание ординат с интервалом дискретизации 0.5 мс позволило, согласно теореме Котельникова [34], выявить составляющие спектра упругих колебаний в частотном диапазоне до 120 Гц. Определение спектров частот выполнено как для всей сейсмической записи, так и для остальных интервалов замедления для каждой из групп скважин.

Так как значения спектральных плотностей на отдельных интервалах контроля исходной сейсмической записи неодинаковы вследствие различных условий взрывания групп скважин и переменных расстояний между точками взрыва и замера, то для графической сопоставимости по оси ординат откладывались не абсолютные значения спектральной плотности амплитуд каждой гармоники, а их отношение к максимальному значению этой плотности. Построение графиков в относительных величинах позволяет сравнить распределение спектральной плотности по оси частот независимо от абсолютного значения скорости смещений в породном массиве в точке наблюдения при подрыве зарядов разных групп.

Амплитудно-частотный спектр полной записи скоростей смещений пород сейсмоприемником 1 при массовом взрыве показан на рис. 7. Максимальные значения спектральных плотностей наблюдаются на частотах, близких к 13, 19 и 36 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности скорости смещений по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 18–20 и 35–37 Гц. Области спектральной плотности, выделяемые на частотах 12–14, 22–28,

32 и 40–42 Гц, не превышают по амплитуде 0.4 от максимума. Всплески до уровня 0.2–0.3 от максимума отмечены в диапазоне частот 8–10, 44–56 и 68–72 Гц. Максимумы на частотах выше 100 Гц не превышают 0.05.

Согласно данным, приведенным в табл. 2, взрывные воздействия, возбуждающие колебания пород, не могут быть одинаковыми как в силу применения разных по мощности зарядов групп взрывааемых скважин, так и в силу возможных структурных изменений в массиве на пути распространения сейсмических волн от этих групп. Заряды отличаются количеством и расположением скважин в группе и соответственно массой взрываемого вещества, а также расстоянием до точки наблюдения. Это естественным образом отражают и записи скорости смещений пород с выделением спектров от взрывов отдельных групп скважин.

Так, из рис. 8 следует, что имеет место изменение частот максимальных значений спектральной плотности на скорости смещений пород, выделенных на интервалах замедления при взрыве соответствующих групп скважин. Видно, что несущие частоты максимальных значений спектральной плотности изменяются в основном от 24 до 38 Гц. При этом отмечены и два значительных отклонения до частот 90 и 48 Гц. Примечательно, что соответствующая по значению спектральная плотность для данных частот на рис. 7 не превышает 0.3–0.4 от максимальной.

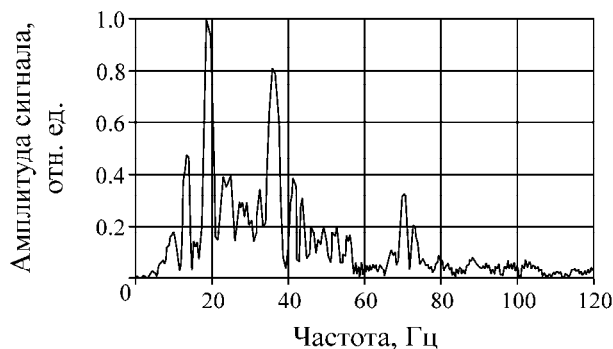


Рис. 7. Спектр скоростей смещений для сейсмической волны в точке замера 1 при действии массового взрыва

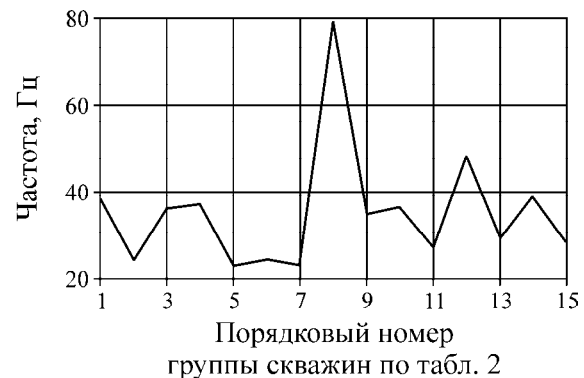


Рис. 8. Изменение частот максимальных значений спектральной плотности скорости смещений в массиве пород, выделенных по интервалам при взрыве упорядоченных групп скважин

Таким образом, спектральный анализ скорости сейсмических колебаний горных пород на интервалах используемых замедлений показал, что каждая из групп взрывааемых скважин возбуждает частоту собственных колебаний, характеризующую конкретные условия формирования взрыва от соответствующего заряда (геомеханические, структурные).

Уровень интенсивности механического возмущения от сейсмической волны от взрывов в точках измерений не выходит за пределы значений, при которых происходит нарушение естественной сплошности в породном массиве. Важно при этом отметить и практическую независимость (в пределах эксперимента) несущих частот максимума спектральной плотности от параметров используемых зарядов, а также от расстояния до места осуществляемого взрыва. Это указывает на то, что выделенные частоты, вероятно, определяются как параметрами примененного паспорта БВР, так и частотами собственных колебаний блоков горных пород в месте проведения массового взрыва. При этом, как следует из спектра на рис. 7, при формировании сейсмозрывной волны на удалении ~400 м от очага взрыва, в точке измерений на частотах 12–13 и 19 Гц проявляется низкочастотная (маятниковая) волна с кратностью 2 по линейке частот максимумов пиков, выделенных на рис. 8, или корень из 2 — по линейке частот, выделенных на рис. 7.

ВЫВОДЫ

Таким образом, активно развиваемые в настоящее время в геомеханике и геофизике теоретические и экспериментальные исследования по количественному описанию структурного строения и нелинейного деформирования массивов горных пород в рамках фундаментальной концепции их блочно-иерархического строения по М.А. Садовскому дают основу для новых направлений совершенствования существующих и создания новых энергосберегающих технологий ведения буровзрывных работ.

Значительный потенциал повышения энергетической эффективности разрушающего действия массовых взрывов в массивах горных пород заключен в инициировании колебательных движений естественных отдельностей и их раскрытия (в «маятниковом» приближении) для наперед заданного диапазона их линейных размеров в очаговых зонах. Для реализации этого потенциала необходимы целенаправленные научные исследования и технические разработки по созданию достаточно прецизионных по ступеням замедления и срабатывания детонаторов скважинных зарядов ВВ в канонической их соподчиненности линейным размерам ожидаемого гранулометрического состава взорванной массы горных пород.

Натурные экспериментальные исследования сейсмических воздействий массовых взрывов на горный массив, выполненные в условиях карьера по добыче строительного камня, позволили установить, что частота максимума спектральной плотности скорости колебаний пород, выведенных из состояния равновесия под воздействием взрывов, зависит от блочного строения участка массива горных пород в месте расположения взрывааемых групп скважин. Значения частот максимумов спектральной плотности сейсмической волны зависят от величин зарядов по группам скважин и интервалов замедления. По мере увеличения времени динамического воздействия на массив частоты максимальных значений спектральной плотности скорости колебаний в массиве пород, выделенных по интервалам замедления при взрыве упорядоченных групп скважин, изменяются немонотонно, с тенденцией смещения в область более высоких частот.

Авторы выражают благодарность специалистам Искитимского карьера ОАО «Новосибирское карьероуправление» В. Н. Кабанцу, А. П. Стахневу, М. В. Михайлову за помощь в проведении работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 2004.
2. Физика взрыва. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975.
3. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007.
4. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1979.
5. Брозд Г. Л. Расчеты взрывов на ЭВМ. — М.: Мир, 1975.
6. Покровский Г. К., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. — М.: Промстройиздат, 1957.
7. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971.
8. Челидзе Т. Л. Об аномально высокой тензочувствительности электропроводности неоднородных сред // ЖЭТФ. — 1981. — Т. 87. — Вып. 2 (8).
9. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряжено-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999.
10. Опарин В. Н. К основам скважинной геофизической дефектоскопии. Ч. I. Спектральный анализ и меры дефектности // ФТПРПИ. — 1982. — № 6.

11. Курленя М. В., Опарин В. Н., Матасова Г. Г., Морозов П. Ф., Тапсиев А. П., Тапсиев Г. А., Федоренко Б. В. О методике построения карт нарушенности массивов горных пород по данным геофизического каротажа. Ч. IV. Некоторые практические приложения // ФТПРПИ. — 1992. — № 2.
12. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1.
13. Курленя М. В., Адушкин В. В., Опарин В. Н. и др. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2.
14. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсивном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа v_{μ} // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.
15. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. I. Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // ФТПРПИ. — 1996. — № 3.
16. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. II. Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4.
17. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. III. Данные натуральных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
18. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН. — 1979. — Т. 24. — № 4.
19. Садовский М. А. О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. — 1982. — № 12.
20. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
21. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
22. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ — 2000. — № 4.
23. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
24. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
25. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4.
26. Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
27. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1.
28. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Аникин А. А., Балмашнова Е. Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
29. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976.
30. Опарин В. Н., Середович В. А., Юшкин В. Ф., Иванов А. В., Прокопьева С. А. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
31. Программа управления станцией сейсморазведочной инженерной цифровой “Лакколит 24-М” (модель 01). Руководство оператора. — М.: ООО “Логис” (Раменское), 2005.
32. Инструкция по применению неэлектрической системы инициирования. — Новосибирск: ГУП “Новосибирский механический завод “Искра”, 2010.
33. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Сов. радио, 1963.
34. Харкевич А. А. Спектры и анализ. — М.: ГИТЛ, 1957.