УДК 550.34

А.И.ГОНЧАРОВ, В.И.КУЛИКОВ
Институт горного дела РАН, Москва, Россия
А.А.ЕРЕМЕНКО
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВОВ В РУДНИКАХ И КАРЬЕРАХ

Проведены натурные исследования сейсмовзрывных волн на ряде железорудных предприятий страны. На карьерах КМА подтверждено, что сейсмический эффект массовых взрывов зависит от эпицентрального расстояния между блоком и объектом и от массы заряда в группе. Зависимости скорости колебаний для карьеров и рудников отличаются коэффициентом сейсмичности, который при подземных массовых взрывах почти в три раза меньше, чем при массовых взрывах на карьерах.

Natural researches of blast waves on a number iron enterprises of the country are carried out. It is confirmed on quarries of KMA, that the seismic effect of mass explosions depends from epicentral distances on the block up to object and from weight of a charge in group. Dependences of speed of fluctuations for quarries and mines differ in factor of seismicity which at underground mass explosions almost three times is less, than at mass explosions on quarries.

Современная тенденция взрывной разработки железорудных месторождений – это увеличение объемов разрушаемых рудных блоков и, соответственно, увеличение мощности массовых взрывов для повышения экономической эффективности горного производства. Переход карьеров КМА к массовым взрывам мощностью более 1000 т ВВ позволил перейти на трехнедельный цикл производства, включающий буровые работы, проведение взрыва и очистные работы на взорванных блоках. Немаловажен и другой аспект – безопасность. Известно, что подземные рудники Горной Шории относятся к удароопасным. Практический опыт показал, что кардинальное решение проблемы защиты от горных ударов заключается в сокращении числа вызывающих их массовых взрывов за счет увеличения мощности и масштабов отбойки руды. В качестве примера сошлемся на Шерегешевский рудник, который перешагнул рубеж 700 т, что позволило ему перейти к циклу работ с двумя массовыми взрывами в год.

В связи с необходимостью обеспечения сейсмобезопасности массовых взрывов такой мощности (напомним, что существующие правила безопасности буровзрывных работ* распространяются только на горные взрывы мощностью до 1000 т) были проведены натурные исследования сейсмовзрывных волн на ряде железорудных предприятий страны. Причем исследования проводились как на карьерах КМА (Лебединский, Стойленский и Михайловский ГОК), так и на рудниках (Шерегешевский в Горной Шории). Эта работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 05-05-64821.

Методика исследований. Исследования сейсмического действия массовых взрывов осуществлялись регистрацией сейсмовзрывных волн с помощью мобильных сейсмических станций ИДГ РАН. Каждая мобильная сейсмическая станция имеет в своем составе три сейсмоприемника СМ-3КВ, блок формирования характеристик сейсмического канала (усилители с фильтрами), АЦП и ноутбук в качестве регистратора. Характеристики сейсмоприемников широко известны, поэтому укажем только характеристики всего сейсмического канала в целом. Блок формирования создавал столообразную амплитудно-частотную характеристику сейсмоканала

* Безопасность при взрывных работах / Госгортехнадзор России. М., 2002. Сер.13. Вып.1. 248 с.

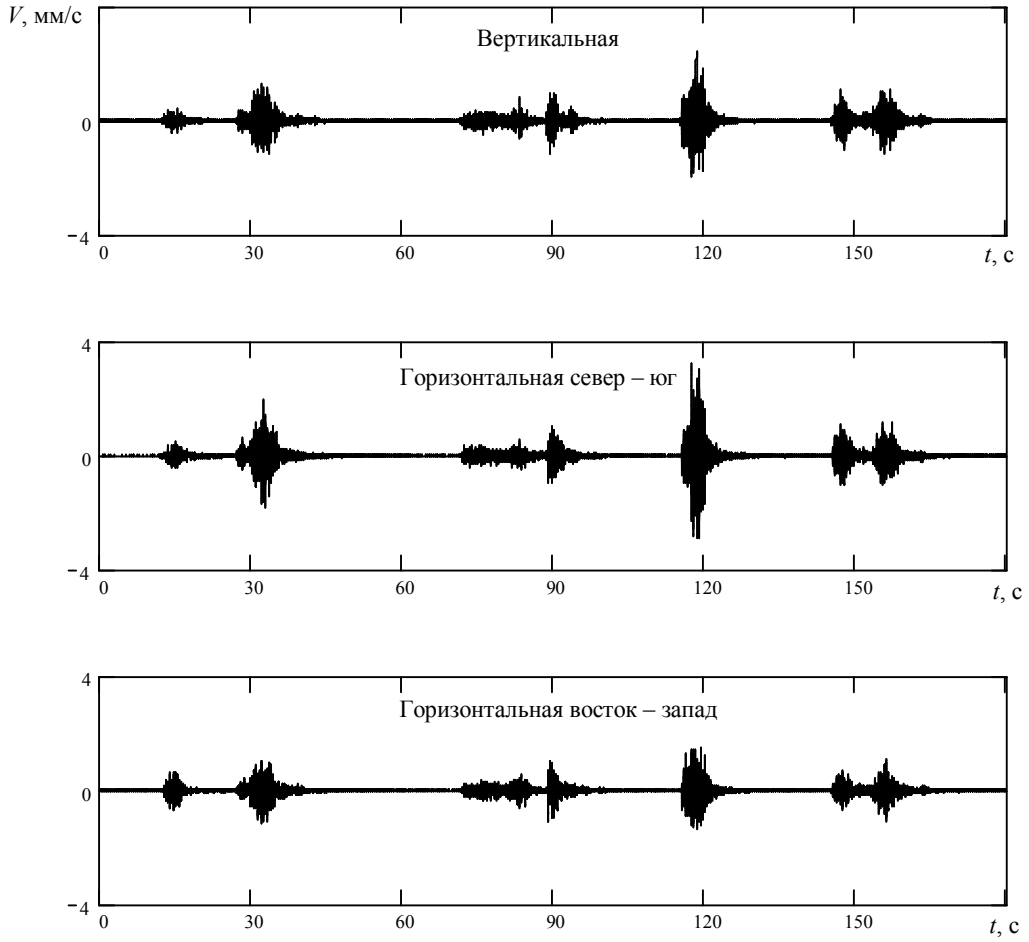


Рис.1. Типичные велосиграммы сейсмических колебаний, зарегистрированные при массовом взрыве на карьере Лебединского ГОКа

с коэффициентом преобразования около 4000 В/(м·с) и срезами на частотах 0,5 и 80 Гц с крутизной среза около 60 дБ/октаву.

Сигналы оцифровывались двенадцатиразрядным АЦП типа E-330 фирмы L-Card и записывались на винчестер ноутбука. Специально разработанное математическое обеспечение позволяет оператору установить режим и длительность записи (число каналов регистрации, частоту оцифровки, цену младшего разряда АЦП и т.д.), провести просмотр записанной информации и сделать первичную обработку сигналов. Обычно каналы регистрации работали в режиме непрерывной записи и запускались за несколько часов до массового взрыва.

Как правило, при каждом массовом взрыве работали три-четыре мобильные сейсмостанции. Станции размещались на земной поверхности на различных расстояниях от взрываемого блока. Один из трех сейсмоприемников регистрировал вертикальную составляющую колебаний, два других – горизонтальные составляющие в направлении юг – север и запад – восток.

Первичными записями каналов регистрации являются велосиграммы, фиксирующие скорости колебаний поверхности, на которой установлены сейсмоприемники. Обработка зарегистрированных велосиграмм позволила получить сейсмограммы колебаний (смещений при колебаниях) и акселерограммы (записи ускорения при колебаниях) и амплитудные спектры Фурье велосиграмм. Для этого сначала вычисляли амплитудный спектр Фурье скоростей колебаний и затем умножением (делением) на частоту находили спектр ускорений (смещений). Далее, используя обратное преобразование Фурье, получали акселерограммы (сейсмограммы).

Карьерные массовые взрывы. Рассмотрим результаты исследований сейсмического действия массовых взрывов на карьерах КМА. Эти взрывы проводятся по одной схеме: при каждом массовом взрыве осуществляется отработка сразу нескольких блоков. Блоки подрываются последовательно друг за другом или через промежутки времени в несколько секунд. Масса ВВ в блоке различна и может варьировать от 100 до 400 т. Взрывчатое вещество заряжается в скважины глубиной около 20 м и диаметром около 250 мм. Масса ВВ в скважине может достигать 1,5 т. Для снижения сейсмического действия массового взрыва используется порядное короткозамедленное взрывание. В ряду или в группе может быть от трех до семи скважин с массой ВВ в группе 7-10 т. Замедление между группами составляет около 35 мс.

4 мая 2006 г. на Лебединском ГОКе было взорвано 13 блоков (рис.1). Суммарная мощность массового взрыва 2285 т ВВ. По числу блоков и мощности это рядовой массовый взрыв для карьера КМА. Сейсмостанция была установлена на борту карьера вблизи от здания рудоуправления и размещалась на различном расстоянии от блоков. Ближайший к станции блок находился на расстоянии 1,13 км, наиболее удаленный блок – на расстоянии 3,47 км. На рис.1 показаны записи длительностью 180 с. На велосиграммах можно выделить короткие цуги от взрыва отдельных блоков, в ряде случаев цуги от отдельных блоков сливаются в общий более длинный цуг.

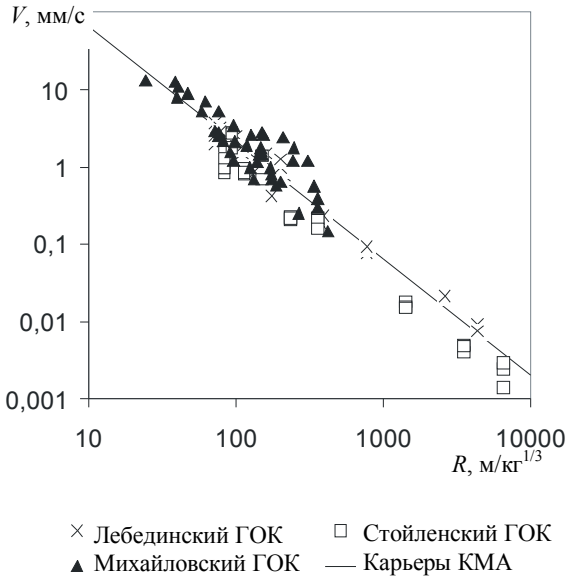


Рис.2. Зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного расстояния для взрывов в карьерах КМА

В спектрах велосиграмм выделяются два максимума: наиболее интенсивный и широкий в полосе частот от 1 до 10 Гц и более узкий на частоте около 30 Гц. Последний, по-видимому, связан со временем замедления при подрыве групп.

По велосиграммам были определены максимальные скорости колебаний от каждого блока. Наибольшие амплитуды колебаний на рудоуправлении составляли 2,76 и 2,95 мм/с от блоков, которые были наиболее близкими к станции и находились на расстоянии соответственно 1,22 и 1,13 км. Этой скорости колебаний соответствует интенсивность сейсмических колебаний 2 балла (по шкале В.С.Медведева для горных взрывов). Амплитуда колебаний остальных блоков, которые находились на большем расстоянии, была менее 2 мм/с, интенсивность колебаний составляла 1 балл или менее.

Установлено, что сейсмический эффект массовых взрывов (максимальная скорость сейсмических колебаний) зависит от эпицентрального расстояния блока до объекта (места регистрации) и от массы заряда в группе*. Наши исследования, выполненные в 2000-2006 годах на карьерах КМА, полностью подтвердили эту закономерность.

Из рис.2 видно, что сейсмическое действие массовых взрывов на этих карьерах практически одинаково, поэтому по всей совокупности данных для трех карьеров была построена единая усредненная (сплошная линия) зависимость максимальной скорости колебаний земной поверхности от приведенного расстояния, которая описывается формулой

$$V = 2050\left(\frac{q^{1/3}}{R}\right)^{1,5}, \qquad (1)$$

* *Цейтлин Я.И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И.Цейтлин, Н.И.Смолий. М.: Недра, 1981. 192 с.

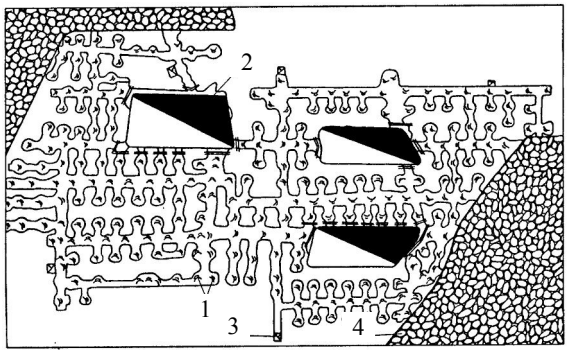


Рис.3. Схема отработки рудного блока на Шерегешевском руднике в плане

1 – пучки скважин, заряженных ВВ; 2 – компенсационные камеры; 3 – восстающая выработка; 4 – разрушенная порода

где V – скорость колебаний, мм/с; q – масса заряда в группе, кг (на одну ступень замедления); R – эпицентральное расстояние, м.

Получение единой зависимости (1) для трех карьеров КМА означает, что сейсмический эффект массовых взрывов на этих карьерах одинаков. Этот результат не является неожиданным, так как взрывы на этих карьерах ведутся в одинаковых рудных блоках – железистых кварцитах с одинаковой крепостью по шкале Протодьяконова (около 16-18).

Массовые взрывы на Шерегешевском руднике. Железорудные месторождения на Шерегешевском руднике в Горной Шории разрабатывают системой этажного принудительного обрушения. Разрушение блока производят взрывной отбойкой пучковыми сближенными зарядами.

Рассмотрим подробнее технологию проведения массового взрыва суммарной мощностью 700 т ВВ, произведенного 26 ноября 2000 г. (рис.3). Ширина блока составляла 50-70 м, длина бурового горизонта 120 м, высота блока 90 м. Блок располагался на этажах 325-395 м.

Все скважины разбуривали диаметром 100 мм. Глубина нисходящих пучков скважин составила 50 м; восходящих 20 м. Эффективность дробления достигалась применением пучков сближенных скважин. Число скважин в пучках составляло от 3 до 13. Отдельные пучки скважин объединяли в группы и подрывали одновременно. Масса ВВ в группах изменялась от 8,8 до 73 т. Ступени замедления между группами составляли 20, 25, 50, 250 и 500 мс. Столь сложную схему подрыва иллюстрирует диаграмма выделения энергии взрыва во времени, построенная на рис.4, *а*. Максимальный по массе заряд 73 т приходится на группу, взорванную через 250 мс после начала взрыва.

Важной особенностью массового взрыва является то, что отбойка руды производится на рыхлые обрушенные породы и компенсационные камеры. Как видно из рис.3, было пройдено три компенсационные камеры с шириной 8,5-12,5 м и длиной 22,5-25 м на всю высоту блока.

Контроль за сейсмическим действием этого массового взрыва осуществлялся на трех сейсмостанциях. Отметим, что зарегистрированная продолжительность колебаний существенно меньше, чем при массовых взрывах на карьерах. Группы зарядов, взорванные спустя 1 с и более после начала взрыва, практически не вносят вклад в сейсмовзрывную волну, что, по-видимому, связано с экранирующим действием раздробленного рудного блока. В спектре, наряду с основным максимумом на частоте 1-2 Гц, содержится максимум с частотой 50 Гц, обусловленный интервалами замедления.

Регистрация сейсмовзрывных волн на Шерегешевском руднике была повторена по той же технологии при массовом взрыве 20 июня 2004 г. Суммарная мощность взрыва составляла 325 т ВВ, максимальная масса ВВ на одну ступень замедления 48 т. При взрыве были зарегистрированы велосиграммы, аналогичные тем, что приведены на рис.4.

Для определения сейсмического эффекта массовых взрывов в рудниках была построена зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного эпицентрального расстояния. Приведенное расстояние рассчитывалось, как эпицентральное расстояние, деленное на корень кубический из массы ВВ в максимальной группе. Для первого взрыва была взята масса ВВ

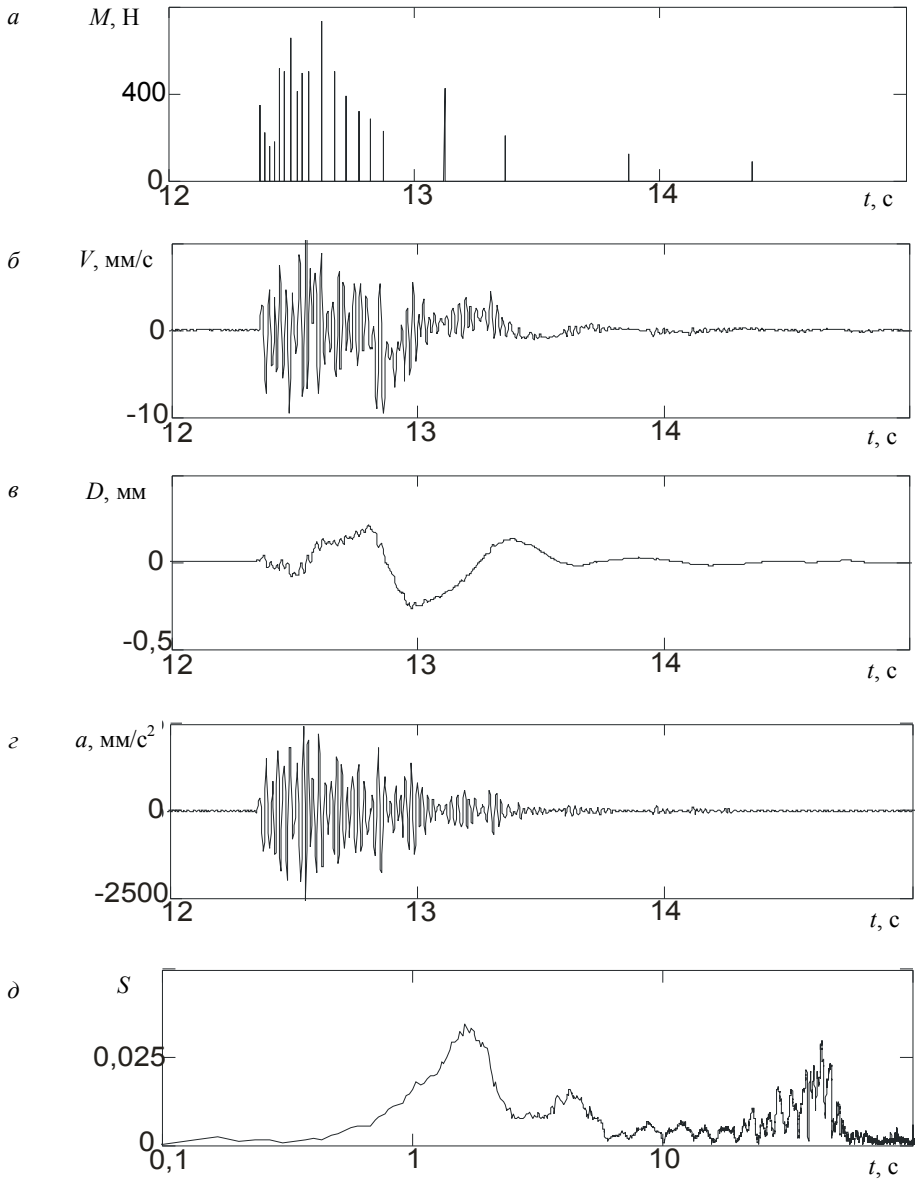


Рис.4. Диаграмма выделения энергии взрыва во времени (*а*), велосиграмма (*б*), сейсмограмма (*в*), акселерограмма вертикальных колебаний (*г*) и спектр велосиграммы, зарегистрированной на эпицентральном расстоянии 650 м при взрыве на Шерегешевском руднике (*д*)

73 т, для второго – 48 т. На рис.5 различными значками показаны зарегистрированные максимальные скорости колебаний по вертикали (ромбы), по горизонтали в направлении юг – север (квадраты) и в направлении запад – восток (треугольники). Для эпицентрального расстояния 19,3 км были взяты амплитуды в продольной волне. Причем незачерненные значки соответствуют первому взрыву, зачерненные – второму. Полученные данные могут быть описаны единой усредненной зависимостью

$$V = 700\left(\frac{q^{1/3}}{R}\right)^{1,5}, \qquad (2)$$

которая на рис.5 показана сплошной линией. На этом же рисунке для сравнения пунктиром приведена зависимость (1) для массовых взрывов на карьерах.

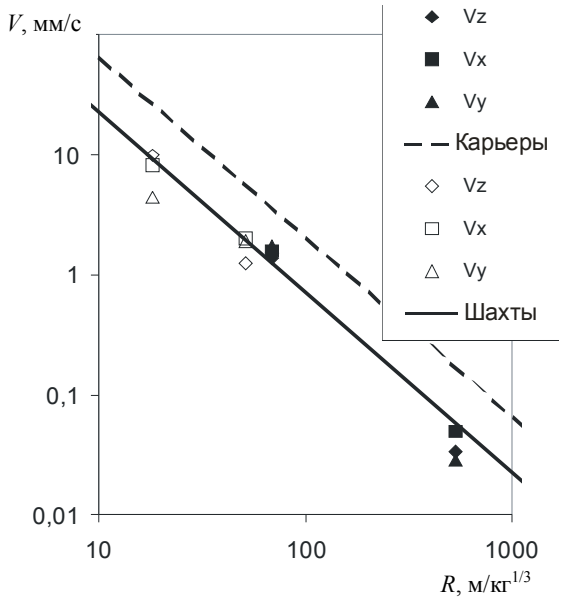


Рис.5. Зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного расстояния для взрывов в Шерегешевском руднике

Зависимости (1) и (2) для карьеров и рудников отличаются коэффициентом, который принято называть коэффициентом сейсмичности. Считается, что значение коэффициента сейсмичности определяется свойствами вмещающих пород в гипоцентре взрыва. Однако взрывы на карьерах и в руднике, как отмечалось выше, проводились в одинаковой породе – железистом кварците и с одинаковой крепостью (16-18) по шкале Протодьяконова. Поэтому различие в сейсмическом эффекте этих взрывов можно объяснить только особенностями технологии разработки рудных блоков. Отбойка руды в сторону компенсационных камер и в направлении обрушенной породы, предварительное создание верхнего бурового горизонта и подсечного пространства блока веерными скважинами способствуют снижению сейсмического действия массового взрыва в руднике. Понятно, что в предельном случае (при 100-процентном обуривании и изоляции блока от горного массива) можно вообще исключить излучение сколько-нибудь сильных сейсмовзрывных волн в окружающий массив или вплотную приблизиться к условиям декаплинга.

Если формально сравнивать зависимости (1) и (2) на рис.5, то можно оценить сейсмический эквивалент шерегешевских взрывов. Так, первый шерегешевский взрыв по сейсмическому действию эквивалентен карьерному взрыву с массой заряда в группе 8,6 т – это в 8 раз меньше реальной массы ВВ в группе, которая, как указывалось выше, составляла 73 т.

При оценке сейсмической безопасности следует учитывать, что коэффициент сейсмичности в формулах (1) и (2) подземных массовых взрывов почти в 3 раза меньше, чем при массовых взрывах на карьерах.