

Richardson J.E., Melosh H.J., Greenberg R.J., O'Brien D.P. The global effects of impact-induced seismic activity on fractured asteroid surface morphology // *Icarus*. 2005. V. 179. P. 325–349.

Richardson J.E. Cratering saturation and equilibrium: A new model looks at an old problem // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 697–715.

Soderblom L.A. A model for small-impact erosion applied to the lunar surface // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 1970. V. 75. P. 2655–2661.

УДК 622.235

АКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ ПРИ ШАХТНОЙ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.И. Куликов

ИДГ РАН

Проведен мониторинг массовых взрывов в г. Губкин при взрывной отбойке железной руды в шахте им. Губкина АО «Комбинат КМАруда». В ходе мониторинга, наряду с регистрацией сейсмовзрывных волн, получены регистрограммы давления воздуха. Показано, что в эпицентре взрыва вертикальные сейсмовзрывные колебания дневной поверхности излучают плоские воздушные волны. Анализируется их амплитуда, частота и воздействие на население города.

Введение

Разработка железорудных месторождений в России ведется с помощью буровзрывных работ (БВР). Причем, значительная доля добываемой руды приходится на подземные рудники. Примером таких предприятий является шахта им. Губкина АО «Комбинат КМАруда». Этому предприятию более 80 лет. Исторически так сложилось, что разрабатываемое месторождение оказалось под жилыми городскими кварталами. На предприятии применяется этажно камерная система разработки. Камеры находятся на глубине 246–285 м от дневной поверхности. Горный массив разбуливается скважинами длиной 50–55 м и диаметром 105 мм. Суммарная масса ВВ в камере 10–20 тонн. Применяется коротко-замедленное взрывание; на одну ступень замедления приходится 0,5–1,5 тонны ВВ. При каждом массовом взрыве с интервалом 30–50 секунд взрывается 3–4 камеры, расположенные на расстоянии около 1 км друг от друга, то есть сразу 3–4 района города оказываются в эпицентре взрывов. И такие массовые взрывы проводятся еженедельно.

В результате застройка города и его инфраструктура подвержены сильному воздействию сейсмовзрывных волн. Сейсмические колебания от массовых взрывов шахты ощущаются населением города, что является причиной негативных

психофизиологических эмоций отдельных граждан, их беспокойства за сохранность застройки. С целью разработки мер по снижению негативных последствий БВР или уменьшению интенсивности их воздействия до безопасного уровня в городе был организован сейсмический мониторинг массовых взрывов и проведено исследование параметров сейсмовзрывных волн.

Мониторинг осуществлялся и стационарной сейсмической станцией, и мобильными сейсмостанциями, причем, мобильные станции размещались в эпицентре взрываемых камер. На них размещались трехкомпонентные велосиметры СМ-3КВ или акселерометры А1638. Одновременно регистрировались вертикальная составляющая колебаний и две горизонтальные в направлении юг-север и запад-восток. Сигналы с сейсмоприемников поступали на вход аналого-цифрового преобразователя и записывались на винчестер ноутбука. Частота оцифровки составляла 1 кГц/канал. Полоса пропускания велосиметров 0,5–80 Гц, акселерометров до 400 Гц. Пункты мониторинга также имеют акустический канал, где первичным преобразователем служит измерительный микрофон фирмы Bruel&Kjaer серии 4170. Микрофон имеет очень широкую полосу регистрации от 0,02 Гц до 20 кГц и динамический диапазон 160 дБ.

Акустическое действие подземных БВР

При проектировании карьерных массовых взрывов акустическому эффекту взрыва уделяется большое внимание, в частности, определяются радиусы безопасных зон по действию воздушных волн на людей и на остекление застройки. На карьерах систематически проводится мониторинг воздушных волн. Однако мониторинг массовых взрывов на шахте им. Губкина показал, что и подземные взрывы являются источниками воздушных волн.

На рис. 1 (вверху) приведена сейсмограмма вертикальной скорости колебаний при массовом взрыве на КМАруде. В качестве сейсмоприемника использовался велосиметр СМ-3КВ. На осях отложена скорость в мм/с, время в секундах. Суммарная мощность взрыва в камере составляла 8,04 тонны ВВ, максимальная масса ВВ в одной ступени составляла 1136 кг. Сейсмоприемник был установлен в эпицентре камеры. Центр камеры находился на глубине 285 м от дневной поверхности. Скорость вертикальных колебаний поверхности земли при этом взрыве достигала 15 мм/с. На рис. 1 (внизу) приведена регистрируемая акустическая волна. На осях отложено давление воздуха в Па и время в секундах. Запись акустического давления и сейсмограммы велись синхронно на один ноутбук с частотой оцифровки 1 кГц. Микрофон был установлен на штативе на высоте 30 см от поверхности земли и на расстоянии 1 м от сейсмоприемника.

Из рис. 1 видно, что сейсмограмма и акустическая регистрируемая волна имеют вступление в один момент времени, то есть воздушная волна вызвана сейсмическими колебаниями. Фазы сжатия (положительного давления воздуха) соответствуют движению поверхности земли вверх и наоборот, фазы разрежения соответствуют движению поверхности вниз. Все это говорит о том, что воздушная волна создана сейсмическими колебаниями дневной поверхности.

На рис. 2 приведены амплитудные спектры сейсмограммы (вверху) и воздушной волны (внизу), полученные быстрым преобразованием Фурье. Спектры нормированы на максимальную спектральную амплитуду. Из рисунка видно, что спектры подобны и также подтверждают, что воздушная волна образована колебательным движением дневной поверхности.

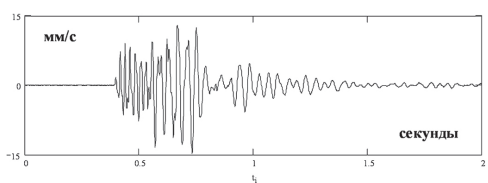


Рис. 1. Велосиграмма вертикальных колебаний и регистрограмма давления воздуха

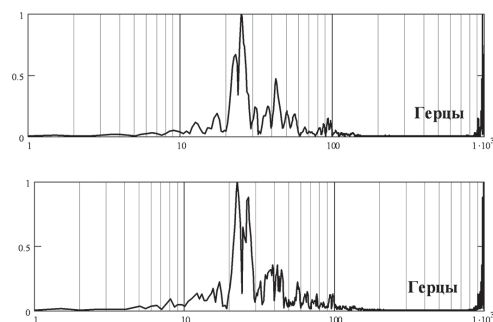


Рис. 2. Спектры сейсмограммы (вверху) и воздушной волны (внизу)

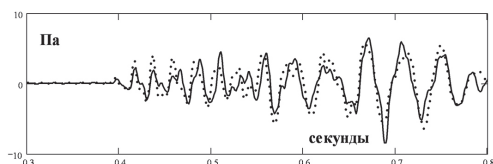


Рис. 3. Регистрограмма воздушной волны (сплошная линия) и расчет воздушной волны по велосиграмме (точечная линия)

Для интервала времени 0,3–0,8 секунды, показанного на рис. 3, был проведен корреляционный анализ регистрограммы воздушной волны и велосиграммы колебаний, который дал коэффициент корреляции 0,833. Для всей велосиграммы и регистрограммы воздушной волны, показанных на рис. 1 (для интервала времени 0–2 секунды), коэффициент корреляции составил 0,736.

Оба результата подтверждают, что воздушная волна была излучена сейсмозрывными колебаниями дневной поверхности. Во втором случае коэффициент корреляции оказался меньше, и это понятно, так как «хвост» воздушной волны искажали воздушные волны, отраженные от окружающей застройки этой местности.

Основные спектральные составляющие в воздушной волне от 10 до 100 Гц, максимум спектра приходится на частоту 25 Гц. Амплитуда зарегистрированной воздушной волны около 6,5 Па. Делим на опорное давление $2 \cdot 10^{-5}$ Па, получим уровень звука воздушной волны 110 дБ. На рис. 4 приведена номограмма различной

Механизм образования воздушной волны очевиден. Дневная поверхность земли является своеобразным поршнем, движущимся на границе с атмосферой со скоростью вертикальных колебаний V . Эта скорость передается слоям воздуха, примыкающим к дневной поверхности. От дневной поверхности начинает распространяться вверх плоская воздушная волна. Воздушная волна с амплитудой меньше атмосферного давления распространяется со скоростью звука в воздухе $C = 340$ м/с. В плоской звуковой волне давление и скорость связаны соотношением (причем, и на фронте, и за фронтом воздушной волны):

$$p = \rho V C \quad (1)$$

где p – давление в воздушной волне, $\rho = 1,28$ кг/м³ – плотность атмосферного воздуха. Формула (1) позволяет пересчитать велосиграмму в воздушную волну, используя коэффициент $\rho C = 435$ Па м/с.

На рис. 3 сплошной линией приведен начальный фрагмент регистрограммы воздушной волны, а точечной линией показана велосиграмма, умноженная на коэффициент 435, то есть расчетная воздушная волна. Из рис. 3 видно хорошее совпадение расчетной и зарегистрированной волны, что подтверждает вышеописанный механизм образования воздушной волны.

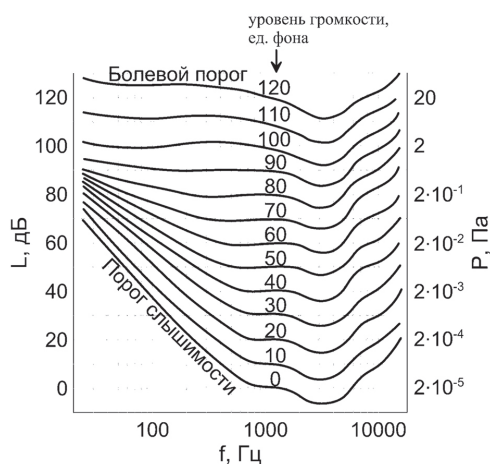


Рис. 4. Номограммы громкости звука

Но дискомфорт очевиден и воздушная волна – это дополнительный фактор к сейсмическим колебаниям, может вызвать беспокойство у населения города, а у отдельных лиц негативные психофизиологические эмоции.

В заключение следует сказать, что жалобы населения города на действие массовых взрывов могут быть связаны с обоими факторами, сейсмическими колебаниями и воздушной волной, действие которых совпадает по времени абсолютно, а население, как правило, не может различить эти два фактора воздействия подземных массовых взрывов. Отметим, что подобный эффект генерации воздушных волн сейсмическими волнами обсуждался в работе академика [Голицын, 1967] после сильнейшего землетрясения с магнитудой 8,4 на Аляске (27.03.1964 г.). Авторы показали, что их источником являлись поверхностные волны Рэлея.

Выводы

В ходе сейсмического мониторинга массовых взрывов на шахте им. Губкина в эпицентре взрываемых камер были зарегистрированы воздушные волны подземных взрывов, определен механизм их излучения и оценена степень воздействия на население города.

Литература

Голицын Г.С., Кляцкий В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности // Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3, № 10, с. 1044–1049.

Иоффе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике. М. : Связь. 1979.

громкости звука от частоты [Иоффе, 1979]. Из рис. 4 видно, что порог слышимости на частоте 25 Гц имеет уровень 65 дБ, следовательно, зарегистрированная воздушная волна будет хорошо слышна населением города в районе эпицентра камеры и уровень громкости этой волны будет около 110 дБ.

Из рис. 4 также видно, что болевой порог слышимости в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц около 120 дБ и он практически не зависит от частоты. Следовательно, никакой опасности для слухового аппарата человека такие воздушные волны не представляют.