



**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ВЗРЫВА
ПО СКЛОНУ БОРТА УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА**

В. Ф. Юшкин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: L14@ngs.ru, Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Экспериментально установлено трехкратное усиление максимальных амплитуд колебаний массива в конечной фазе последовательного подрыва групп скважинных зарядов при распространении сейсмической волны взрыва за пределами обрабатываемого блока в четвертичных отложениях борта угольного разреза. Показано, что эффект “раскачивания” массива происходит ступенчато, синхронизируясь в соответствии с выбранными интервалами замедления при взрывании.

Четвертичные отложения, усиление волны взрыва, сейсмические измерения

**PECULIARTIES OF SEISMIC BLAST WAVE PROPAGATION
ALONG THE COAL MINE SLOPE**

V. F. Yushkin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: L14@ngs.ru, Krasnyi pr. 54, Novosibirsk, 630091 Russia*

Triple gain of the maximum amplitudes of massif vibrations in a final phase of the consecutive blasting of groups of borehole charges during the propagation of a seismic blast wave outside the mined block in the Quaternary deposits of a coal mine slope has been experimentally established. The effect of “rocking” the massif occurs stepwise, and it is synchronized according to the selected delay intervals at detonation.

Quaternary deposits, gain of blast wave, seismic measurements

Влияние массовых взрывов на структурно-деформационные изменения в бортах угольных разрезов на месторождениях, расположенных в четвертичных отложениях, связано с их разрушающим действием на обрабатываемые блоки извлекаемых пород, однако особенности распространения волны взрыва в горном массиве за пределами блоков практически не исследованы. В нормативных документах по ведению взрывных работ на дневной поверхности [1] существует некоторый консерватизм в оценке опасности техногенных воздействий массовых взрывов на горный массив. Первые проявления таких воздействий в угольных разрезах отмечались сейсмологами еще в 60-х годах XX в. [2]. Благодаря в основном ученым ВНИМИ эта проблема решалась, так как были разработаны правила безопасного ведения открытых горных работ с применением взрывных технологий в условиях увеличения глубин отработки угольных месторождений, что позволило снизить опасность обрушений горных пород в бортах, однако эффективное использование энергии взрыва в обрабатываемом блоке оказалось проблематичным.

Как показано в [2], природно-техногенная сейсмичность на угольных месторождениях, расположенных в четвертичных отложениях, достигла стадий, когда, кроме естественно-природных землетрясений и мелкофокусных техногенных сейсмических событий в районах ведения откры-

тых горных работ все чаще стал наблюдаться новый тип сейсмической активности — роевые сейсмические события, чередующиеся с относительно мощными землетрясениями. Эпицентры последних, согласно [2], приурочены к глубинным “прорастающим разломам” — аналогам горно-тектонических ударов. Считается, что основным инициатором таких землетрясений служит накопленная тектоническая энергия, однако предполагается, что время и место ее сброса существенно зависят от техногенных событий.

Накопление фактических данных о процессах деформирования, переформирования, скорости разрушения и отступления бортов угольных разрезов как по поверхности, так и в глубине массива показывает, что такие изменения происходят в основном под влиянием как геолого-гидрологических, инженерно-технологических, так и природно-климатических факторов, поэтому за состоянием бортов и установлением взаимосвязи их разрушения с сейсмическими проявлениями необходимо осуществлять системные количественные наблюдения с применением соответствующих 3–5D измерительно-мониторинговых систем.

Наиболее доступными и отработанными являются маркшейдерско-геодезические методы, позволяющие дистанционно контролировать структурно-деформационные изменения, включая разрушения на поверхности горных образований [3], а также сейсмические методы [3, 4]. Последние достаточно широко применяются для решения задач структурной геологии, но существенно реже — для количественного контроля развития деформационно-волновых процессов в массивах горных пород в масштабах полей горного отвода угольных разрезов. Используемые при этом схемы инструментальных сейсмических измерений при необходимости могут адаптироваться к конкретным горно-геологическим условиям [3, 4].

Угольные месторождения, размещенные в отложениях осадочного происхождения, обладают относительно низкими показателями деформационно-прочностных свойств грунтов и пород в сравнении с более крепкими магматическими или метаморфическими породами, что способствует сбросу сейсмической энергии. Характерные показатели прочностных свойств вмещающих пород и угля некоторых месторождений приведены в таблице.

Прочность четвертичных отложений ряда угольных месторождений [5]

Месторождение	Порода	Плотность, т/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Из многих месторождений	Аргиллиты Алевриты	2.50–2.90	20–70
Кузнецкий бассейн	Крепкий уголь	~ 1.3	30–50

Задача данной работы заключается в изучении сейсмическим методом особенностей распространения волновых воздействий за пределами взрываемого блока в четвертичных отложениях борта угольного разреза для малых глубин и расстояний (в пределах 50 м) по профилю местности. Для регистрации распространения упругой волны взрыва выбран уступ борта смотровой площадки. Сейсмические измерения проводились по склону уступа в виде выборочного профилирования по системе встречных географов, в качестве источника упругих колебаний волны взрыва при $Y-Y$ и $Z-Z$ расстановке использовались сейсмоприемники с горизонтальной и вертикальной ориентацией оси чувствительности соответственно.

Особенностью сейсмических методов при малоглубинном изучении горных массивов является зависимость получаемой волновой картины от условий возбуждения и приема колебаний. Для оценки распространения волны взрыва в бортах разреза экспериментально изучались особенности эволюции ее динамико-кинематических характеристик в массиве в условиях склона смотровой площадки борта на отметках между гор. +245.7 и +265.7 м (рис. 1).

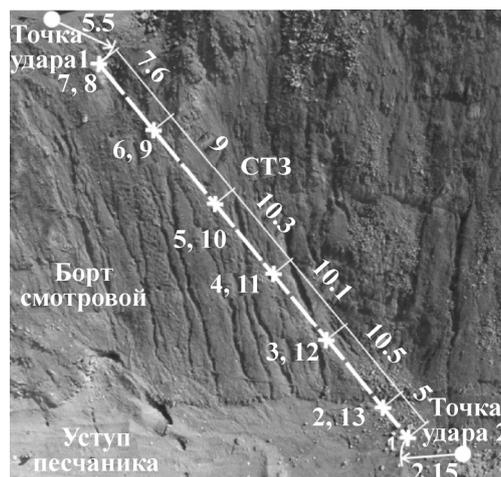


Рис. 1. Вид склона смотровой площадки, где показана схема установки сейсмоприемников парами, обозначенных ×, их номера указаны рядом (1–7 — сейсмоприемники вертикальной, 8–13 — горизонтальной в направлении массива ориентации оси чувствительности). Расстояния даны в метрах

Горизонт смотровой площадки представлен слабоустойчивыми грунтами: глинами с примесью суглинков, сопряженных с выположенными пропластками дресвы мощностью до 1 м, ниже находится “спрессованный” слабо сцементированный тонкозернистый глинистый песчаник мощностью в десятки метров, который при увлажнении и механических воздействиях способен разрушаться с существенным снижением сил сцепления, становясь достаточно рыхлым. Параметры слагающих пород уступа: глина (коэффициент крепости $f=0.7-0.8$, плотность $\rho = 1.6-1.8 \text{ т/м}^3$); дресва ($f=0.8-1.2$, $\rho = 1.27-1.33 \text{ т/м}^3$); песчаник ($f=2-4$, $\rho = 2.56-2.6 \text{ т/м}^3$).

На рис. 1 показана схема установки сейсмоприемников для регистрации распространения сейсмической волны взрыва по уступу песчаника и откосу смотровой площадки. Схема ориентирована в направлении места проведения взрыва, расположена под углом $\sim 45^\circ$ к горизонту по склону уступа. Склон на участке измерений выбран без видимых трещин. На фотографии можно заметить русловые впадины глубиной 0.3–0.5 м, образованные стоком дождевых вод.

Запись колебаний выполнялась с учетом методических рекомендаций, изложенных, в частности, в работах [3, 6–8], с использованием сейсмостанции “Лакколит 24-М” [9] и сейсмоприемников GS20-DX в количестве 13 шт., установленных по склону смотровой площадки. Сейсмоприемники 1–7 размещены с ориентацией оси максимальной чувствительности вертикально к почве, сейсмоприемники 8–13 — с ориентацией оси максимальной чувствительности горизонтально в направлении откоса смотровой. Длина трассы измерений составила 49.5 м (без учета ответвления длиной 5 м на горизонтальной поверхности уступа песчаника (рис. 1)).

Принятая ориентация сейсмоприемников позволила зарегистрировать вертикальные и горизонтальные компоненты упругих колебаний склона борта. По выбранному профилю осуществлена запись сейсмической волны, вызванной массовым взрывом отрабатываемого блока на удалении ~ 750 м от смотровой площадки. Взрываемый блок был расположен на нижнем горизонте в глубине угольного разреза. В ходе эксперимента получена натурная сейсмограмма распространения в массиве упругого волнового пакета от массового взрыва. В связи с ограничением времени t (длительность записи сигнала сейсмостанцией не превышала 1.5 с) на сейсмограмме зарегистрированы начальная и заключительная части волны взрыва.

На рис. 2 показан фрагмент сейсмограммы волны, формируемой при подрыве групп скважинных зарядов отрабатываемого блока. Для связи со схемой измерений (рис. 1) на записи слева показана шкала с обозначением номеров каналов соответствующих сейсмоприемников. Запись отражает изменения скорости колебаний по каждому каналу измерений и показывает фактические соотношения затухания волны при распространении по трассе.

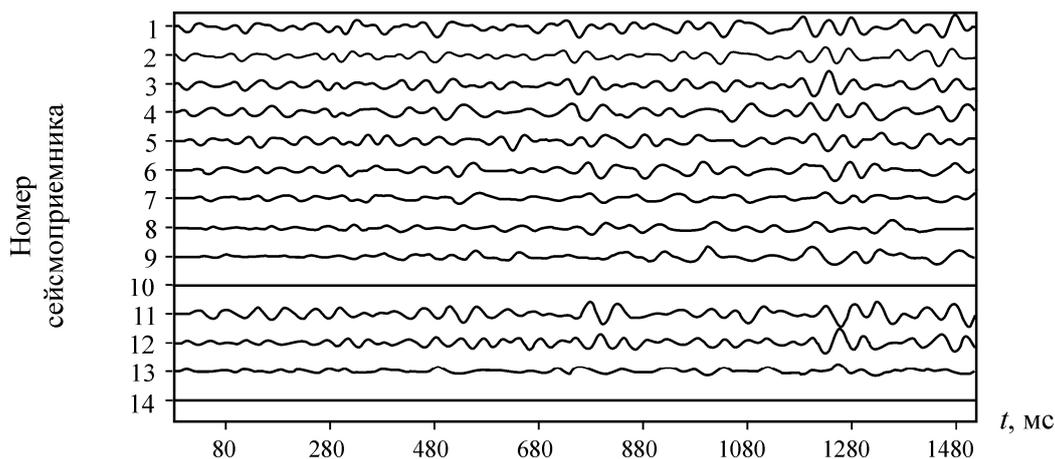


Рис. 2. Исходная запись вертикальной (каналы 1–7) и горизонтальной (каналы 8–13) компонент сейсмической волны, зарегистрированной по откоосу смотровой площадки в начальной части взрыва

При анализе сейсмограмм установлено, что по мере распространения сейсмической волны по откоосу на участке между сейсмоприемниками 1–7 амплитуда вертикальной компоненты волны снижается примерно в 1.3–1.4 раза, между сейсмоприемниками 2–3 — в 1.2–2.6 раза. Следует отметить, что отложения, на которых расположены сейсмоприемники 3–5, прочно соединены с массивом песчаника через пропластки дресвы. На участке между сейсмоприемниками 1–2 уступ песчаника сильно трещиноват. Здесь амплитуда сейсмического сигнала снижается приблизительно в 4 раза. При переходе в песчаник изменение амплитуды не превышает 1.7 раза. Образование трещины в песчанике, видимой на рис. 1 внизу слева, связано с природно-климатическими факторами.

В работе [3] на примере карьера известняка показана расшифровка записи сейсмической волны взрыва в привязке максимумов амплитуд к моментам времени подрыва групп скважинных зарядов с учетом интервалов замедления при взрывании. Такая расшифровка позволяет определить изменение частот максимальных значений спектров скорости колебаний для сейсмической волны взрыва в массиве, выделенных по интервалам замедлений при подрыве упорядоченных групп скважинных зарядов. Каждая из групп подрываемых скважин в обрабатываемом блоке возбуждает собственные колебания с частотой, характерной для конкретных условий в массиве.

По интервалам замедлений на сейсмограмме несложно выделить вступления упругой волны при подрыве каждой из групп скважинных зарядов [3]. На сейсмограмме видно, что на момент вступления упругих колебаний от подрыва группы скважин следующего интервала замедления скорость колебаний пород от предыдущего подрыва не успевает понизиться до нуля, хотя и испытывает значительное затухание. Таким образом, обрабатываемый блок пород при подрыве зарядов с принятым замедлением не успевает “успокоиться” и сейсмическая волна от предшествующего взрывного воздействия накладывается на следующую. Наблюдается “самораскачивание” массива, при этом усиление амплитуды результирующей сейсмической волны происходит ступенчато в соответствии с интервалами замедления.

На рис. 3 показаны изменения максимальных значений амплитуд вертикальной и горизонтальной компонент скорости колебаний массива по трассе измерений для начальной и заключительной части волны взрыва, распространяющейся по склону смотровой площадки. Видно, что наблюдается усиление практически в три раза максимальной амплитуды колебаний массива в конечной фазе последовательного подрыва групп скважинных зарядов, что указывает на возможность “раскачивания” массива. Этот факт подтверждает способность триггерного влияния взрыва на усиление сейсмической активности вблизи месторождения, когда незначительные по энергетике события способны инициировать более мощные события.

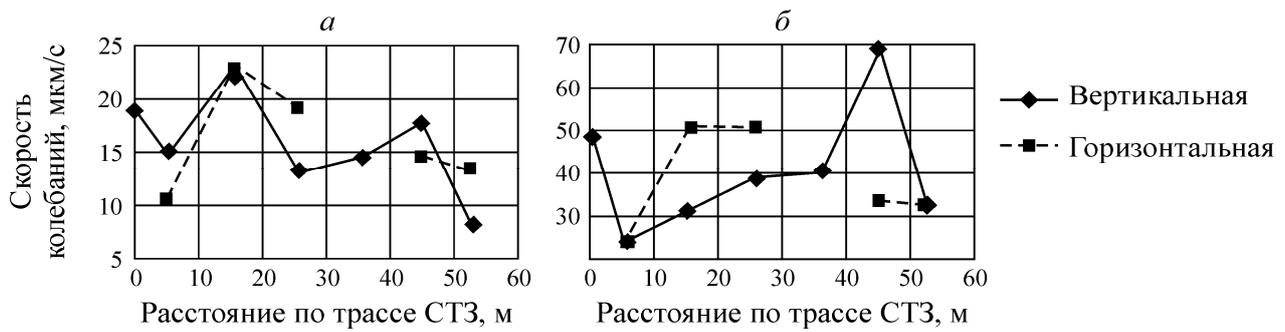


Рис. 3. Изменение скорости колебаний поверхности откоса по трассе измерений в начальной (а) и конечной (б) части взрыва для вертикальной и горизонтальной компонент сейсмической волны. Разрыв графиков по горизонтальной компоненте связан с отказом сейсмоприемника по каналу 10

На рис. 4. показаны изменения спектров вертикальных и горизонтальных компонент сейсмических колебаний по каждому каналу измерений распространения волны взрыва. На графиках наблюдается смещение максимумов амплитуд колебаний в область низких частот, характерное для волн “маятникового” типа. По годографу исходной записи вычислены средние скорости распространения вертикальной (1013 м/с) и горизонтальной (685 м/с) компонент упругой волны взрыва в четвертичных отложениях исследуемого уступа борта разреза.

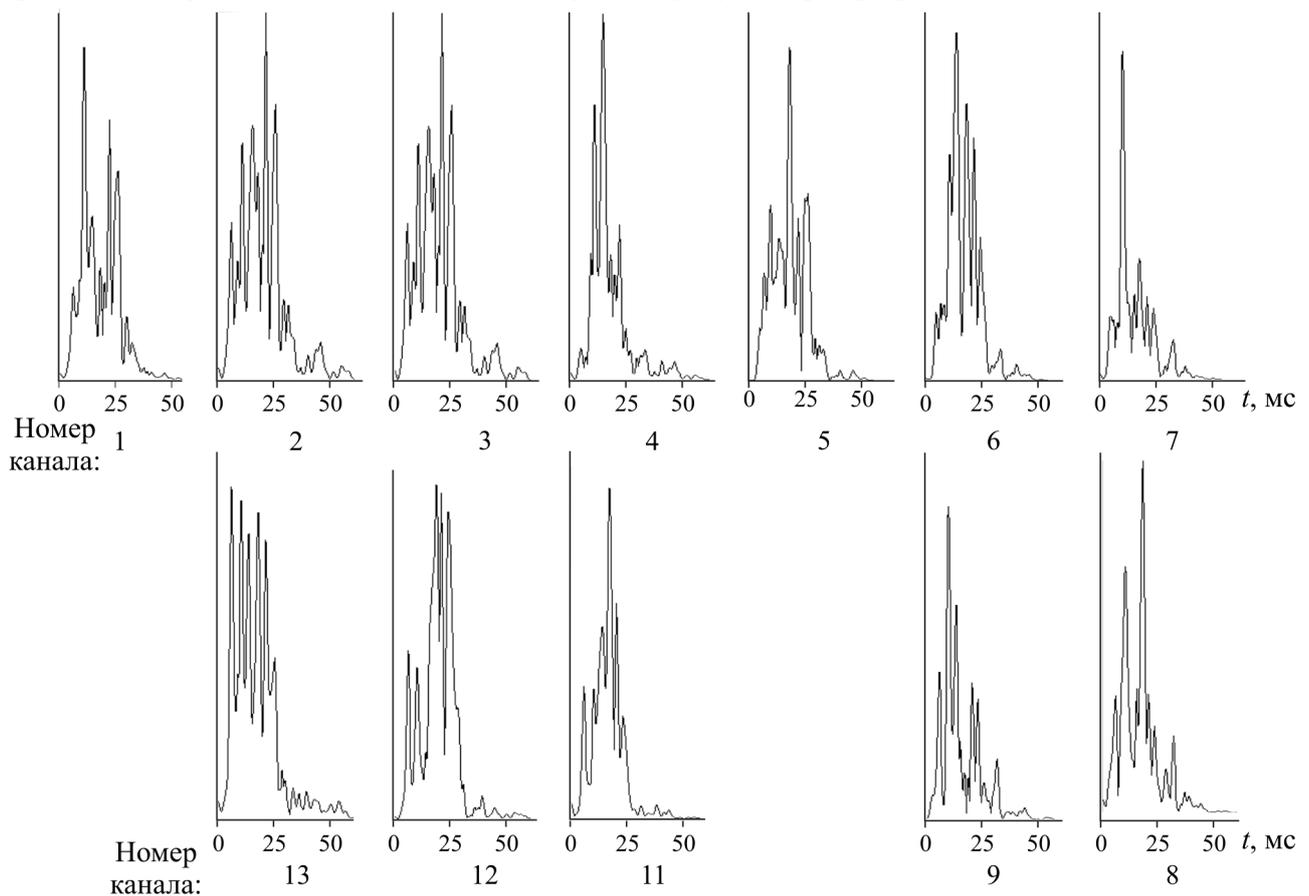


Рис. 4. Изменение спектров волны взрыва по каналам измерений. Все графики нормированы в децибелах

Сопоставление периодов колебаний волны взрыва по ступеням замедления с результатами визуального осмотра взорванной горной массы позволяет оценить качество взрывных работ, определить фракционный состав горной массы с привязкой по месту обрабатываемого блока, что существенно для дальнейшей переработки добываемого сырья и может служить основанием кор-

ректировки параметров буровзрывных работ. В перспективе при выполнении соответствующих структурно-геомеханических исследований маркшейдерскими средствами может быть отработан метод оценки качества взрывных работ с использованием сейсмограмм взрыва.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности распространения упругой волны взрыва в массиве четвертичных отложений борта угольного разреза за пределами обрабатываемого блока. Запись сейсмических колебаний, проведенная на удалении ~750 м от взрываемого блока на нижнем горизонте, позволила определить, что амплитуда колебаний грунта при распространении волны по склону борта затухает примерно в 1.3–1.4 раза. Установлено усиление практически в три раза максимальных амплитуд вертикальной и горизонтальной компонент скорости колебаний массива в результате его раскачивания в конечной фазе последовательного подрыва групп скважинных зарядов в соответствии с принятыми интервалами замедления, что указывает на возможность “раскачивания” массива. Этот факт может служить подтверждением триггерного влияния технологического взрыва на усиление сейсмической активности вблизи бортов угольного разреза, когда незначительное по энергетике событие может инициировать более мощное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Technical regulations** of conducting explosive works on a day surface, Moscow, Nedra, 1972, 240, pp. [Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. — М.: Недра, 1972. — 240 с.]
2. **Yakovlev D. V., Lazarevich T. I., and Tsirel S. V.** Natural and induced seismic activity in Kuzbass, *Journal of Mining Science*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 862–872. [Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 20–34.]
3. **Oparin V. N., Yushkin V. F., Porokhovskiy N. N., Grishin A. N., Kulnich N. A., Rublev D. E., and 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. [Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 74–89.]
4. **Yushkin V. F.** Change of inverse properties of subsoil under freezing, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 189–195. [Юшкин В.Ф. Об изменении свойств грунтов при замерзании // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 4. — № 2. — С. 189–195.]
5. **Handbook** (Cadastre) on Physical Properties of Rocks, Melnikova N. V., Rzhovsky V. V., Protodyakonov M. M. (Eds.), Moscow, Nedra, 1975, 280 pp. [Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова. — М.: Недра, 1975. — 280 с.]
6. **Methods** for estimating seismic impacts (gudielines), *Problems of engineering seismology*, 1993, issue 34, pp. 5–94. [Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. — 1993. — Вып. 34. — С. 5–94.]
7. **Gainanov V. G.** Seismic exploration: A Textbook, Moscow, MGU, 2006, 149 pp. [Гайнанов В. Г. Сейсморазведка: учеб. пособие. — М.: МГУ, 2006. — 149 с.]
8. **Adushkin V. V.** Tectonic earthquakes of anthropogenic origin, *Physics of the Solid*, 2016, no. 2, pp. 173–194. [Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 22–44.]
9. **Seismic station** “Laccolith-24M”. LLC Logis enterprise, Zhukovsky. [Electronic edition], 2015, Access mode: <http://www.logsys.ru>.] [Сейсмостанция “Лакколит-24М”. Предприятие ООО “Логис”, г. Жуковский [Электронное издание], 2015. Режим доступа: <http://www.logsys.ru>.]