

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРОТКОЗАМЕДЛЕННОГО КАРЬЕРНОГО ВЗРЫВА

В. Н. Глазнев, Д. О. Плаксин*, Е. Ю. Дручек*

Воронежский государственный университет

* Государственный научно-исследовательский испытательный институт
проблем технической защиты информации ФСТЭК России

Поступила в редакцию 30 сентября 2009 г.

Аннотация. В статье рассматривается одна из возможных моделей стохастического описания типичного короткозамедленного карьерного взрыва. Модель основана на представлении последовательности взрывов отдельных ступеней как некоторого случайного процесса с характерными статистическими параметрами замедлений, обусловленными техническими характеристиками взрывных замедлителей. Приводится описание математической модели короткозамедленного взрыва и сопоставление предложенной модели с реальными сейсмическими сигналами, полученными от карьерных взрывов.

Ключевые слова: короткозамедленный взрыв, стохастическая модель, экспериментальные исследования.

Abstract. The article deal with one of the possibly stochastic model for description of the typical delay-fired quarry blast. This model based on the representation of the blast sequence as an random blast process with definite delays, which caused by technical characteristics of the delay-fired tube. The mathematical description of the proposed delay-fired explosion model was made. The theoretical results was tested with real seismic signals for delay-fired quarry explosions.

Key words: delay-fired explosion, stochastic model, experimental research

Введение

При разработке полезных ископаемых открытым способом и при производстве взрывных работ на выброс грунта часто используются специальные системы взрывания, при которых один мощный взрыв заменяется последовательностью более малых по интенсивности взрывов, разнесенных в пространстве и по времени. Такие системы взрывания носят название короткозамедленных. При этом отдельные заряды (или системы зарядов) – так называемые «ступени» – взрываются в определенной последовательности, обеспечивая максимальный эффект для разрушения горной породы и в то же время минимизируя энергию излучения сейсмических волн в горный массив, поскольку сейсмические волны могут нанести ощутимый ущерб близко расположенным инженерным сооружениям

карьера. Вопросы изучения сейсмического эффекта короткозамедленных систем взрывания уже достаточно давно рассматриваются в сейсмологических исследованиях и сейсморазведке [1, 2] с целью выяснения возможностей использования карьерных взрывов для решения задач изучения строения земной коры и верхней мантии. Особенно важным в этом плане является вопрос о точности представления времен пробега [3–7] и спектральном составе регистрируемых сейсмических волн [8–11] при использовании карьерного взрыва, характеризующихся относительно большой растянутостью во времени, в качестве источника зондирующего сейсмического сигнала.

К настоящему времени предложено несколько общих математических моделей, описывающих формирование и распространение сейсмического волнового пакета и изменение его спектрального состава при взрыве последовательности отдельных

ступеней с замедлением. Такого рода модели техногенных сейсмических событий имеют принципиальное значение при решении задач идентификации карьерных взрывов на фоне естественных сейсмологических событий и возможных мощных взрывов ядерных испытаний [12–14]. Кроме того, сейсмические сигналы от карьерных взрывов часто используются для целого построения региональных моделей коры и верхней мантии [15–19] в отдельных районах, что требует адекватного описания спектрального состава волны от таких взрывов.

В целом, предложенные ранее модели короткозамедленных систем взрывания сводятся к аддитивному суммированию отдельных сигналов в предположении о линейности системы, описывающей общий процесс генерации сейсмического сигнала взрыва. В такой постановке прямая задача вычисления спектра сейсмического сигнала решается однозначно для каждого конкретного взрыва с известной системой замедлений между ступенями, но, как отмечается многими исследователями [4, 5, 7, 11, 18], на практике подобные построения часто не согласуются с теоретической моделью сейсмического сигнала. Именно это обстоятельство диктует необходимость разработки более адекватных спектральных моделей короткозамедленных систем взрывания, пригодных для практического использования при идентификации взрывов такого рода и повышения достоверности построения скоростных моделей коры и верхней мантии. Рассмотрим последовательно каноническую детерминированную модель короткозамедленного сейсмического сигнала взрыва и ее развитие на общий случай.

Детерминированная модель короткозамедленного взрыва

Пусть имеется единичный сейсмический импульс $f(t)$ с ограниченной энергией, такой что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [f(t)]^2 dt < +\infty. \quad (1)$$

Спектр единичного импульса определим через интеграл Фурье [20] в форме

$$s(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{i\omega t} dt. \quad (2)$$

Рассматривая систему короткозамедленного взрывания как последовательность из N сейсмических импульсов одинаковой формы и разной амплитуды, появляющихся в некоторые определенные моменты времени, суммарный сейсмический сигнал запишем в форме

$$F(t) = \sum_{n=0}^N a_n f(t - \tau_n), \quad (3)$$

где a_n – множитель амплитуды и τ_n – задержка появления импульса « n ». Вычислим спектр функции $F(t)$, воспользовавшись теоремой о спектре суммы и теоремой смещений

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} \sum_{n=0}^N a_n f(t - \tau_n) dt = \\ &= \sum_{n=0}^N a_n \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - \tau_n) e^{-i\omega t} dt = \\ &= \sum_{n=0}^N a_n e^{-i\omega \tau_n} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt = \\ &= s(\omega) \sum_{n=0}^N a_n e^{-i\omega \tau_n} = s(\omega) h(\omega, N, a_n, \tau_n). \quad (4) \end{aligned}$$

В выражении (4) функция $h(\omega, N, a_n, \tau_n)$ представляет спектральную переходную характеристику линейной системы для последовательности из N импульсов одинаковой формы, смещенных относительно начала на некоторые величины задержек. Приведенное соотношение (4) позволяет оценить специфику преобразования спектра одиночного импульса в случае, когда систему можно рассматривать как аддитивную последовательность отдельных импульсов. В частности, при $a \equiv a_n$ и $\tau_n = \tau \cdot n$, учитывая известное [21] значение конечного ряда комплексных экспонент, получим

$$\begin{aligned} h(\omega, N, a_n, \tau_n) &= a h(\omega, N, \tau) = \\ &= a \sum_{n=0}^N e^{-i\omega n \tau} = a \frac{e^{-i\omega(N+1)\tau} - 1}{e^{-i\omega \tau} - 1}. \quad (5) \end{aligned}$$

Модуль переходной характеристики h , равный по определению [20] сумме квадратов его вещественной и мнимой компоненты

$$\begin{aligned} |h(\omega, N, \tau)| &= a \left\{ \text{Re}^2 [h(\omega, N, \tau)] + \right. \\ &\quad \left. + \text{Im}^2 [h(\omega, N, \tau)] \right\}^{1/2}, \quad (6) \end{aligned}$$

можно вычислить непосредственно из (5). После ряда простых преобразований, переходя к нормированным значениям модуля переходной характеристики, запишем его в форме

$$\left| \tilde{h}(\omega, N, \tau) \right| = \frac{a}{N+1} \left| \frac{\sin[(N+1)\pi \nu \tau]}{\sin(\pi \nu \tau)} \right|, \quad (7)$$

где в качестве аргумента используется частота колебаний ν ($\omega = 2\pi\nu$). Приведенное выражение для переходной характеристики линейной системы короткозамедленного взрыва в форме (7) часто используется для анализа сейсмического сигнала карьерного взрыва [2–5 и др.].

Типичный вид нормированной переходной характеристики показан на рис. 1 для некоторых конкретных значений параметров a , N и τ . Очевидно, что при одинаковой амплитуде импульсов наблюдаемая характеристика совпадает с классической интерференционной зависимостью: при увеличении числа ступеней взрыва увеличиваются по амплитуде и сужаются по частоте главные интерференционные максимумы. В идеале такая характеристика должна эффективно пропускать низкочастотную часть спектра одиночного сигнала и, кроме того, служить полосовым фильтром для частот, кратных характерному времени замедления.

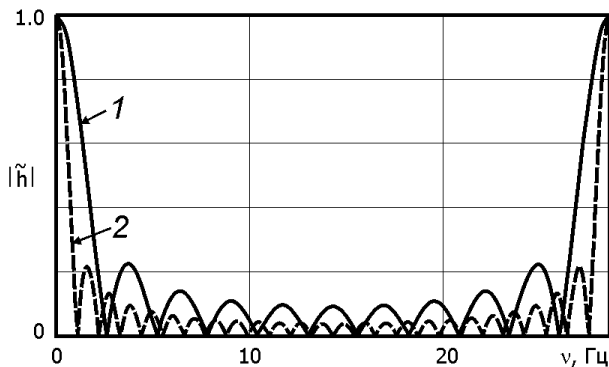


Рис. 1. Переходная характеристика идеализированной системы короткозамедленного взрыва. Параметры: 1 – $a = 1$, $N = 10$, $\tau = 35$ мс; 2 – $a = 1$, $N = 25$, $\tau = 35$ мс

На практике, однако, этого не наблюдается, поскольку реальные детонаторы с замедлением обладают некоторой дисперсией по временам задержки. Судя по литературным данным [22], величина разброса значений замедлений, по крайней мере для отечественных детонаторов, варьирует в диапазоне 2–10 мс, т. е. фактически величины задержек τ_n являются некоторой случайной последовательностью. Это обстоятельство, естественно, нарушает идеализированную картину интерференции, показанную на рис. 1. Кроме того, на нарушение интерференции накладывается и разброс по эффективному (т. е. производящему сейсмический эффект) количеству взрывчатого вещества в отдельных ступенях. Это связано с тем, что первые

ступени взрываются в ненарушенном массиве пород, а последующие – уже в частично раздробленном и ослабленном массиве. Такого рода эффекты известны как для ядерных, так и для карьерных взрывов [23]. Таким образом, указанные выше особенности систем замедления требуют более адекватного описания модели короткозамедленного взрыва.

Стохастическая модель короткозамедленного взрыва

В статистической радиофизике [20] рассмотрен так называемый «импульсный случайный процесс», описывающий бесконечную последовательность идентичных импульсов, основные параметры которых (форма, амплитуда, длительность и момент возникновения переднего фронта и др.) могут изменяться по заданному вероятностному закону. Энергетический спектр $G(\omega)$ импульсного случайного процесса в общем случае записывается как

$$G(\omega) = \frac{2}{\tau} \left\{ \bar{g}(\omega) + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{2N} \left(1 - \frac{n}{2N+1} \right) [q_n(\omega) + q_n(-\omega)] \right\}, \quad (8)$$

где $\bar{g}(\omega)$ – усредненный энергетический спектр импульсов, $q_n(\omega)$ – взаимные спектры импульсов, отстоящих на n интервалов, а величина τ равна среднему значению длины интервалов времени (тактовый интервал) между последовательными импульсами. Такого рода процессы могут описывать вероятностную модель короткозамедленного взрыва, если положить, что последовательность отдельных ступеней взрыва является некоторым случайным аперриодическим процессом, для которого время появления каждого импульса является случайным и вызывает сдвиг по времени всех последующих импульсов.

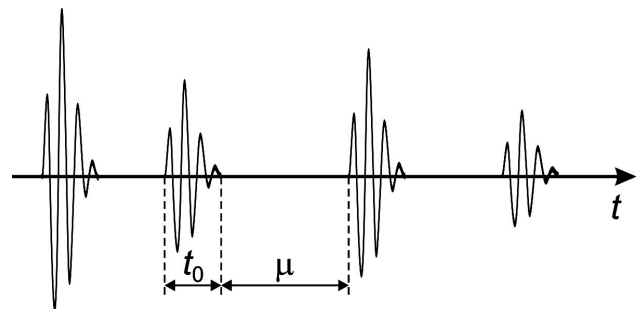


Рис. 2. Пример аперриодического импульсного процесса

Исходя из предположения, что длительность импульсов (взрывов ступеней) t_0 является величиной постоянной, а сами импульсы возникают в независимые друг от друга случайные моменты времени (см. рис. 2), в [20] было получено выражение энергетического спектра такого аperiodического импульсного процесса

$$G(\omega) = \frac{2a^2 t_0^2}{\tau} |s(\omega t_0)|^2 \left[1 + \frac{\sigma^2}{a^2} + 2 \operatorname{Re} \frac{\Theta_\mu(\omega)}{1 - \Theta_\mu(\omega)} + \frac{1}{\tau} \delta(\omega) \right], \quad (9)$$

где $|s(\omega t_0)|^2$ – энергетический спектр единичного импульса постоянной формы и длительности t_0 , a – средняя амплитуда импульсов, σ^2 – дисперсия амплитуд импульсов, Θ_μ – характеристическая функция случайного процесса распределения длительностей интервалов μ между двумя последовательными импульсами, $\delta(\omega)$ – дельта функция, выражающая дискретный спектр постоянной составляющей сигнала. Из выражения (9) после его нормировки по энергетическому спектру импульса $s(\omega)$ следует выражение для квадрата амплитудного спектра переходной характеристики аperiodического импульсного случайного процесса.

Рассмотрим простейший случай такого импульсного процесса в предположении, что паузы между отдельными импульсами распределены нормально со средним значением $\mu_{cp} = \tau - t_0$ и дисперсией σ_μ^2 . Отметим, что допущение о нормальности распределения пауз (строго положительных величин времени) приемлемо только при условии $\sigma_\mu \ll \tau$. В этом случае, принимая во внимание только непрерывную часть энергетического спектра $G(\omega)$ и положив, что импульсы имеют одинаковую амплитуду (дисперсия их амплитуд $\sigma^2 = 0$), преобразуем (9) к виду

$$G(\omega) = \frac{2a^2 t_0^2}{\tau} |s(\omega t_0)|^2 \left[1 + 2 \operatorname{Re} \frac{\Theta_\mu(\omega)}{1 - \Theta_\mu(\omega)} \right] = \frac{2a^2 t_0^2}{\tau} \cdot \frac{|s(\omega t_0)|^2 (1 - |\Theta_\mu(\omega)|^2)}{1 - 2 \operatorname{Re}(\Theta_\mu(\omega)) + |\Theta_\mu(\omega)|^2}.$$

Учитывая известное [20] значение характеристической функции Θ_μ нормального распределения, окончательно имеем

$$\begin{aligned} |H(\nu, \tau, \sigma_\mu)|^2 &= \\ &= \frac{1 - e^{-\sigma_\mu^2 4\pi^2 \nu^2}}{1 - 2e^{-\sigma_\mu^2 2\pi^2 \nu^2} \cos(2\pi\nu\tau) + e^{-\sigma_\mu^2 4\pi^2 \nu^2}}. \quad (10) \end{aligned}$$

Заметим, что в выражении (10) мы перешли ради единообразия к линейной частоте.

График амплитудного спектра переходной характеристики приведен на рис. 3 для некоторых фиксированных значений параметров. Очевидно, что в случае достаточно малых значений дисперсии σ_μ спектр переходной характеристики в пределе стремится к дискретному спектру, главные интерференционные максимумы которого определяются средней длительностью тактового интервала случайного процесса. С другой стороны, при больших значениях стандартного отклонения σ_μ спектр переходной характеристики в пределе стремится к постоянной величине, равной единице в области частот, отличающихся от нуля.

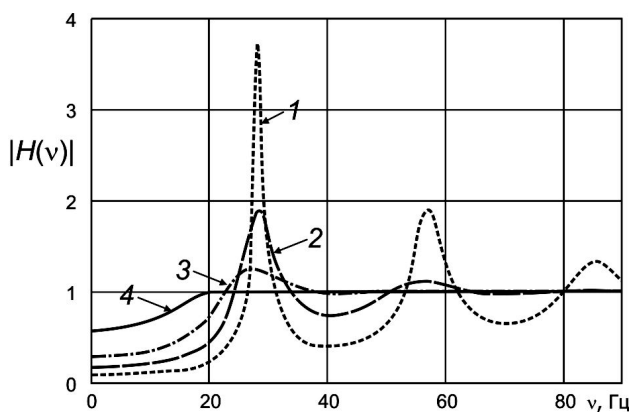


Рис. 3. Переходная характеристика аperiodического импульсного случайного процесса. Средняя длина тактового интервала $\tau = 35$ мс. Значения стандартного отклонения для пауз между импульсами: 1 – $\sigma_\mu = 3$ мс, 2 – $\sigma_\mu = 6$ мс, 3 – $\sigma_\mu = 10$ мс, 4 – $\sigma_\mu = 20$ мс

В целом, приведенное выражение для спектра переходной характеристики аperiodического импульсного случайного процесса достаточно адекватно представляет сущность системы короткозамедленного взрывания. Но при этом следует отметить, что общее аналитическое выражение (10) получено для бесконечной последовательности импульсов и на практике при конечном числе ступеней замедления может реализоваться только приближенно. Вопрос о том, как изменится переходная характеристика короткозамедленного взрыва при конечной длине реализации аperiodического импульсного процесса, можно рассматривать только в статистической постановке [24].

Из определения (4) запишем энергетический спектр конечной последовательности импульсов с произвольной амплитудой

$$G(\omega) = g(\omega) \cdot \left[\left(\operatorname{Re} \sum_{n=0}^N a_n e^{-i\omega\tau_n} \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \sum_{n=0}^N a_n e^{-i\omega\tau_n} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где выражение в квадратных скобках представляет квадрат амплитудного спектра переходной характеристики нашего ограниченного по длительности процесса. Преобразуем это выражение, группируя члены с одинаковыми индексами и переходя к двойным суммам для недиагональных элементов произведения рядов. После упрощения выражение для нормированного амплитудного спектра переходной характеристики можно представить в виде

$$\begin{aligned} |\tilde{H}(\omega, N)| &= \frac{1}{N+1} \left\{ \left[\sum_{n=0}^N a_n \cos(\omega\tau_n) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[\sum_{n=0}^N a_n \sin(\omega\tau_n) \right]^2 \right\}^{1/2} = \\ &= \frac{1}{N+1} \left\{ \sum_{n=0}^N a_n^2 + \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=k+1}^N a_k a_m \cos[\omega(\tau_k - \tau_m)] \right\}^{1/2}. \quad (12) \end{aligned}$$

Спектр переходной характеристики (12) зависит от разности времен начала импульсов и их амплитуд.

Для численного моделирования такого случайного процесса рассмотрим эргодический ансамбль реализаций импульсного процесса конечной длительности (12), принимая, что число импульсов в каждой реализации фиксировано, а параметры импульсов подчиняются некоторой заданной статистике. Исходя из физической сущности нашей задачи, будем считать, что паузы между отдельными импульсами распределены нормально со средним значением μ_{τ} и дисперсией σ_{τ}^2 , причем $\sigma_{\tau} \ll \tau$. Распределение амплитуд импульсов также рассматриваем как нормальный случайный процесс со средним значением $a_{cp} = 1$ и относительной дисперсией σ_a^2 . При численном моделировании аperiodического импульсного случайного процесса, выполненного в системе компьютерной математики «MathCad», относительно устойчивая оценка усреднения появляется уже при десяти реализациях, хотя в рамках каждого ансамбля существуют

отдельные реализации, значимо отличающиеся от средней характеристики. С ростом числа испытаний (больше нескольких десятков) усредненные по эргодическому ансамблю значения спектра переходной характеристики надежно сходятся к некоторому среднему спектру переходной функции, который можно считать типичным для рассмотренных процессов при выбранных параметрах моделирования. Пример такого усредненного спектра переходной характеристики показан на рис. 4.

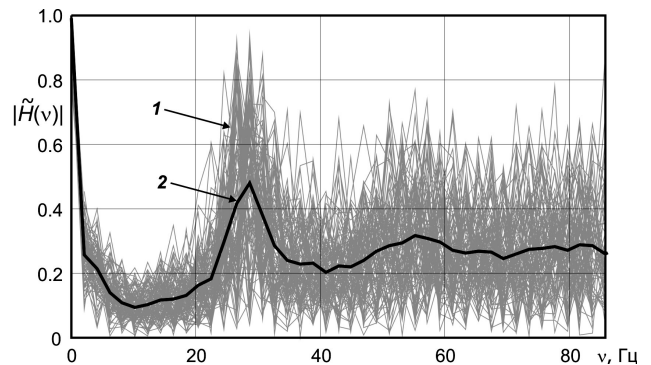


Рис. 4. Последовательность реализаций спектра (1) и усредненный спектр (2) переходной характеристики импульсного случайного процесса конечной длительности. Параметры: количество реализаций $N = 100$, средняя длина тактового интервала $\tau = 35$ мс, стандартное отклонение для пауз $\sigma_{\tau} = 6$ мс, относительное стандартное отклонение для амплитуд импульсов $\sigma_a = 0,25$

Приведенный график усредненной переходной характеристики для аperiodического импульсного процесса конечной длительности демонстрирует те же особенности поведения, что и аналитическое представление (10). Как и для аналитического выражения, представление (12) показывает при определенных параметрах импульсного процесса существование некоторого интерференционного максимума на частоте, соответствующей средней длительности тактового интервала τ . Причем с уменьшением величины дисперсии σ_{τ}^2 эти интерференционные максимумы в спектре переходной характеристики проявляются более четко. При увеличении величины σ_{τ}^2 спектр переходной характеристики стремится к асимптотическому представлению для выражения (10). Вариации дисперсии амплитуд импульсных сигналов σ_a^2 (в разумном относительном диапазоне) сказываются на общей «размытости» реализаций процесса, но незначительно изменяют усредненный спектр переходной характеристики нашего случайного процесса.

Таким образом, приведенное соотношение (12) при условии соответствующей нормировки и зада-

нии законов распределения для пауз между импульсами и амплитуд импульсов, можно рассматривать как стохастическую модель переходной характеристики аperiodического импульсного случайного процесса, соответствующего системе короткозамедленного взрывания. Принципиальным ограничением для такого представления является количество реализаций указанного импульсного случайного процесса. Оно должно быть достаточно большим, что на практике можно получить только при накоплении сигналов от карьерных взрывов, выполняемых примерно в одинаковых условиях на одном и том же объекте.

Сопоставление с экспериментальными данными

С целью проверки предложенной стохастической модели системы короткозамедленного взрывания были проведены экспериментальные наблюдения последовательности маломощных тестовых взрывов, выполненных в карьере «Стрелица» (Воронежская область). Взрывание производилось в борту действующего карьера по добыче огнеупорных глин девонского возраста. Взрывные работы выполнялись в неглубоких скважинах, расположенных на линии, параллельной отбиваемому борту карьера, зарядами по 10 кг взрывчатого вещества. Расстояние между скважинами составляло примерно 5 метров и всего подрывалось 12 ступеней с одинаковым замедлением в 10 мс.

В процессе эксперимента было проведено два идентичных короткозамедленных взрыва. Сейсмический эффект взрывов регистрировался трехкомпонентными сейсмометрами (X , Y , Z велосиметрами) «Geospace» с рабочей частотой в диапазоне 0,5–450 Гц. Запись сейсмических колебаний почвы на дне карьера производилась цифровой аппаратурой «Reftek» (динамический диапазон АЦП 24 бит) на удалении примерно 180 м от центра линии скважин взрывания. Точность временной привязки цифровых сейсмических данных составляла 0,001 с. Канал X регистрирующего сейсмометра был сориентирован на центральную скважину системы взрывания, канал Y – параллельно линии скважин с зарядами, канал Z – вертикально.

Полученные в эксперименте типичные формы записи сигналов сейсмометров показаны на рис. 5. Очевидно, что при столь малых расстояниях от пункта взрыва в сейсмической записи присутствуют все волны, порождаемые источником: продольные и поперечные головные волны, а также поверхностные волны. Эти волны появляются на самых

начальных временах записи и отличаются не столь большими амплитудами суммарного сигнала. Кроме чисто сейсмических волн, на записи выделяются интенсивные акустические волны, которые появляются с задержкой 0,525 с, что соответствует расстоянию до первого источника взрыва. Акустическое воздействие на все каналы записи является наиболее сильным, а его продолжительность превышает 1,5 с, причиной чего, вероятно, являются многократные отражения звуковых волн от бортов карьера. Все указанные волновые процессы накладываются друг на друга, и в силу этого суммарная длительность записи колебаний намного превышает длительность взрывного воздействия на среду, составляющего примерно 0,11 с.

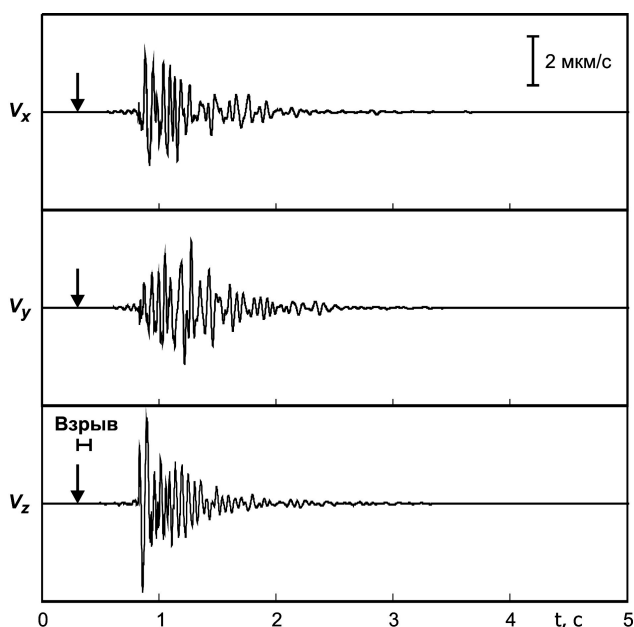


Рис. 5. Запись короткозамедленного взрыва. Вертикальный масштаб скорости перемещения одинаковый для всех трех каналов. Стрелкой показано время начала короткозамедленного взрыва. Горизонтальный отрезок соответствует общей длительности взрыва системы зарядов

Детальная картина для прямых сейсмических волн, приведенная на рис. 6 для рассчитанных значений компонент перемещений поверхности U_x , U_y и U_z в точке наблюдений, показывает первые вступления продольных и поперечных волн. Оценки скорости этих волн в породах разреза дают значения $V_p = 1330$ м/с и $V_s = 770$ м/с, что соответствует величинам сейсмических скоростей в мезозойских глинах Воронежского региона [25]. Как видно из рисунка, длительность чисто сейсмической записи превышает полную длительность ко-

роткозамедленного взрыва, поскольку в сейсмическом сигнале помимо прямых волн присутствуют отражения от кристаллического фундамента, залегающего на глубине примерно 150–200 м [26], а также более медленные компоненты поверхностных сейсмических волн.

Отметим, что первые вступления поверхностных сейсмических волн обладают заметной квазиэллиптической поляризацией с ориентировкой плоскости поляризации, близкой к горизонтальной. Такая особенность волновой картины первых вступлений от короткозамедленного взрыва может быть объяснена существованием двух компонент поперечных волн – SV и SH . Поскольку известно [27], что компонента SH не порождается при одиночном взрыве на поверхности полупространства, то причиной появления этой волны при короткозамедленном взрыве, вероятно, является сама система дискретного взрывания с замедлением. Ранее экспериментально было установлено [27, 28], что при поверхностном взрыве, производящемся вблизи траншейной выработки с раздробленными породами, возникают интенсивные SH -волны. Возможно, именно этот эффект преобразования энергии упругих колебаний взрыва имеет место и при короткозамедленном взрывании: часть объема горного массива, нарушенного предшествующими ступенями взрывания, служит в качестве некоего трансформатора для преобразования энергии продольных волн в интенсивные поперечные колебания.

В силу всех указанных выше обстоятельств изучение характеристик собственно сейсмического сигнала короткозамедленного взрыва на малых удалениях от источника представляется не совсем корректным. Тем не менее изучение такого сигнала можно выполнить и по записям вблизи источника, если в записи имеются сигналы квазивертикальных отражений от глубоких горизонтов земной коры, находящихся во временном диапазоне за пределами активного акустического и сейсмического воздействия поверхностных волн. В нашем случае, когда использованная система регистрации сейсмического сигнала обладала высоким динамическим и частотным разрешением, такого рода отражения можно найти на временах, превышающих несколько секунд после отметки момента взрыва.

Пример фрагмента такой записи сейсмического сигнала приведен на рис. 7, где достаточно надежно устанавливаются отражения на временах 6,6–7,0 с. Отметим, что записи скорости перемещений по отдельным каналам коррелированы между собой для горизонтальных сейсмометров и находятся в

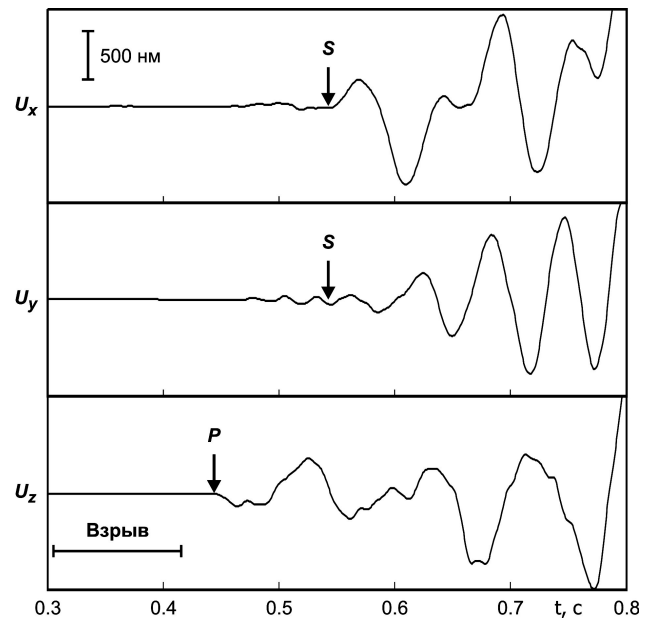


Рис. 6. Сейсмический сигнал первых вступлений. Вертикальный масштаб перемещения одинаковый для всех трех каналов. Стрелками показано первое вступление продольных (P) и поперечных (S) сейсмических волн

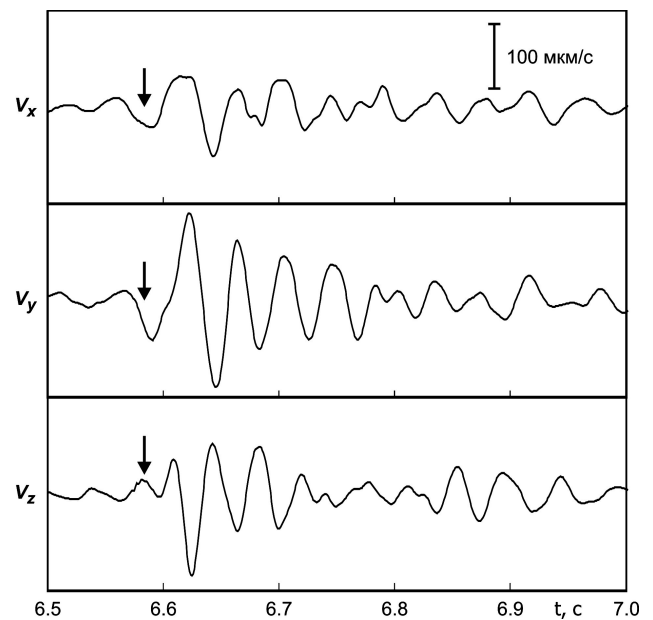


Рис. 7. Сейсмический сигнал от глубокой части разреза земной коры. Вертикальный масштаб скорости перемещения одинаковый для всех трех каналов. Стрелками показано первое вступление продольных сейсмических волн

противофазе с записью вертикального сейсмометра. Кроме того, в записи просматривается достаточно сложный характер сейсмической волны, условно разделяющейся на два волновых пакета в интервалах времен 6,60–6,75 с и 6,85–6,95 с. Такие особенности отражений, вероятно, обусловлены градиентным характером поведения скорости на глубинной границе раздела или наличием двух сближенных глубинных границ. В целом, полученные записи сигналов по длительности и характеру амплитуд позволяют отождествить в первом приближении зарегистрированные отражения как результат воздействия одиночного сейсмического импульса.

Оценки глубинного положения отражающей границы, выполненные в предположении, что скорость продольных волн в верхней части земной коры составляет примерно 6,1 км/с, дают величину 20 км. Такая глубина, характерная для границы раздела между верхней и нижней частями земной коры, достаточно хорошо согласуется с общими представлениями о строении региона [29] и свидетельствует о достоверности выполненных сейсмических наблюдений.

Спектральный анализ зарегистрированных отражений показал, что в спектрах сейсмического сигнала на ранних временах первых вступлений и на временах, соответствующих отражениям от глубинной границы в средней части земной коры, имеются близкие спектральные моды. Рассматривая отраженный сигнал как воздействие практически одиночного импульса, что в первом приближении можно считать допустимым, учитывая более интенсивное поглощение высокочастотной части спектра сейсмических колебаний, можно дать качественную оценку переходной характеристики нашей системы взрывания. величиной, качественно характеризующей переходную характеристику системы, может служить нормированное отношение сглаженных модулей спектров на ранних временах первых вступлений $S_1(\nu)$ и на временах, соответствующих отражениям от глубинной границы – $S_2(\nu)$, определяемое как

$$|R(\nu)| = \frac{|S_1(\nu)|}{|S_2(\nu)|} \bigg/ \frac{|S_1(0)|}{|S_2(0)|}, \quad (13)$$

где в знаменателе фигурирует нормировочный множитель для спектров, соответствующих сигналам. График характеристики $|R(\nu)|$ для нашей системы, показанный на рис. 8 в зависимости от частоты, демонстрирует наличие кратных максимумов на частотах примерно 75–120 Гц и 170–190 Гц. Вид экспериментальной функции $|R(\nu)|$

показывает ее качественное совпадение с теоретической оценкой для стохастической спектральной переходной характеристики системы, приведенной на рис. 4. Именно такой вид переходной характеристики и можно было ожидать для короткозамедленного взрыва при среднем замедлении $\tau = 10$ мс и стандартном отклонении этой величины в $\pm(2-4)$ мс.

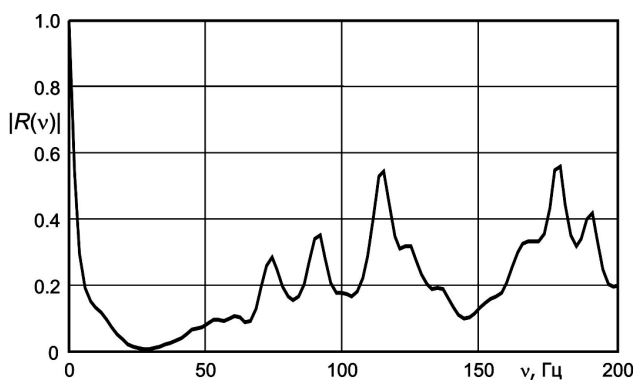


Рис. 8. Оценка переходной характеристики реального короткозамедленного взрыва

Отметим, что приведенная оценка (13) величины $|R(\nu)|$ поддерживается достаточно хорошим совпадением модуля спектра $|S_2(\nu)|$ с каноническим спектром одиночного сейсмического импульса [27]. Именно в силу этого функция $|R(\nu)|$ может рассматриваться как некоторая качественная оценка спектра переходной характеристики системы короткозамедленного взрывания.

Выводы

1. Предложенная модель системы короткозамедленного взрывания позволяет рассматривать технологический карьерный взрыв как некоторый апериодический импульсный процесс со случайным тактовым интервалом.
2. Стохастическая модель переходной характеристики системы короткозамедленного взрывания показывает наличие кратных спектральных мод, соответствующих частотам замедлений взрывов при малых значениях стандартного отклонения для пауз между отдельными ступенями взрывания. При относительно больших величинах стандартного отклонения для пауз между взрывами, в переходной характеристике процесса короткозамедленного взрывания кратные моды исчезают.
3. Сопоставление экспериментальных данных по реальному тестовому короткозамедленному взрыву с предложенной теоретической моделью взрывания на качественном уровне показало хоро-

шее согласие вида спектральной переходной характеристики системы взрывания.

4. При изучении сейсмического сигнала вблизи пункта взрыва на больших временах выявлены устойчивые отражения с временами прихода 6,5–7,0 с. Глубинное положение такой границы раздела оценивается в 20 км, что согласуется с моделями земной коры региона Воронежского кристаллического массива.

Исследования частично выполнены в рамках Аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ по проекту 2.1.1/4637.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цейтлин Я. И. Снижение сейсмического эффекта взрыва при короткозамедленном взрывании / Я. И. Цейтлин, И. А. Ершов // Труды ИФЗ АН СССР. – 1962. – Вып. 21. – С. 51–62.
2. Frantti G. E. Spectral energy density for quarry explosions / G. E. Frantti // Bull. Seism. Soc. Am. – 1963. – V. 53, № 5. – P. 989–996.
3. Greenhalgh S. A. Effects of delay shooting on the nature of P-wave seismograms / S. A. Greenhalgh // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1980. – V. 70, № 6. – P. 2037–2050.
4. Еманов А. Ф. Влияние короткозамедленного взрывания на сейсмограммы глубинного сейсмического зондирования / А. Ф. Еманов // Геология и геофизика. – 1982. – № 9. – С. 81–89.
5. Шаров Н. В. Использование короткозамедленных промышленных взрывов для целей ГСЗ / Н. В. Шаров, Ф. Ф. Горбачевич // Геофизический журнал. – 1983. – Т. 5, № 6. – С. 62–68.
6. Еманов А. Ф. Использование промышленных взрывов при ГСЗ / А. Ф. Еманов, Н. В. Шаров // Геофизический журнал. – 1987. – Т. 9, № 4. – С. 35–43.
7. Stump B. W. Experimental confirmation of superposition from small-scale explosions / B. W. Stump, R. E. Reinke // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1988. – V. 78, № 3. – P. 1059–1073.
8. Суворова Н. И. О частотных спектрах сейсмических колебаний, возбуждаемых промышленными взрывами / Н. И. Суворова. – Л. : Зап. ЛГИ, 1981. – Т. 89. – С. 47–49.
9. Baumgard D. R. Spectral evidence for source multiplicity in explosions: application to regional discrimination of earthquakes and explosions / D. R. Baumgard, K. A. Ziegler // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1988. – V. 78, № 5. – P. 1773–1795.
10. Smith A. T. High-frequency seismic observations and models of chemical explosions: implications for the discrimination of ripple-fired mining blasts / A. T. Smith // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1989. – V. 79, № 4. – P. 1089–1110.
11. Gitterman Y. Spectra of quarry blasts and microearthquakes recorded at local distances in Israel / Y. Gitterman, T. V. Eck // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1993. – V. 83, № 6. – P. 1799–1812.
12. Smith A. T. Discrimination of explosions from simultaneous mining blasts / A. T. Smith // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1993. – V. 83, № 1. – P. 160–179.
13. Arrowsmith S. J. Identification of delay-fired mining explosions using seismic arrays: application to the PDAR Array in Wyoming, USA / S. J. Arrowsmith, M. H. Hedlin, M. D. Arrowsmith, B. W. Stump // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2007. – V. 97, № 3. – P. 989–1001.
14. Allmann B. P. Spectral discrimination between quarry blasts and earthquakes in southern California / B. P. Allmann, P. M. Shearer, E. Hauksson // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2008. – V. 98, № 4. – P. 2073–2079.
15. Chapman M. C. Modeling delay-fired explosion spectra at regional distances / M. C. Chapman, G. A. Bollinger, M. S. Sibol // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1992. – V. 82, № 6. – P. 2430–2447.
16. Kim W. Y. High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions / W. Y. Kim, D. W. Simpson, P. G. Richards // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1994. – V. 84, № 5. – P. 1365–1386.
17. Buyanov A. F. Three-dimensional modelling of the Lapland Granulite Belt and adjacent structures of the Baltic Shield from geophysical data / A. F. Buyanov, V. N. Glaznev, F. P. Mitrofanov, A. B. Raevsky // Norg. Geol. Unders. – 1995. – V. 7. – P. 167–178.
18. Дубянский А. И. Поверхностные волны сейсмических событий в условиях Воронежского кристаллического массива / А. И. Дубянский, С. В. Зайцев, К. Ю. Силкин // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геол. – 2005, № 1. – С. 221–225.
19. Goforth T. T. Characteristics of regional seismograms produced by delay-fired explosions at the Minntac iron mine, Minnesota / T. T. Goforth, C. H. Hetzer, B. W. Stump // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2006. – V. 96, № 1. – P. 272–287.
20. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники (Книга первая) / Б. Р. Левин. – М. : Советское радио, 1974. – 550 с.
21. Прудников А. П. Интегралы и ряды / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Марищев. – М. : Наука, 1981. – 797 с.
22. Матвейчук В. В. Взрывные работы : учебное пособие / В. В. Матвейчук, В. П. Чурсалов. – М. : Академический Проект, 2002. – 384 с.

23. *Архипов В. Н.* Механическое действие ядерного взрыва / В. Н. Архипов [и др.]. – М. : Физматлит, 2002. – 384 с.

24. *Бусленко Н. П.* Метод статистических испытаний / Н. П. Бусленко, Д. И. Голенко, И. М. Соболев, В. Г. Срагович, Ю. А. Шрейдер. – М. : Физматлит, 1962. – 332 с.

25. *Тарков А. П.* Результаты микросейсмокаротажных работ в ближней зоне НВ АЭС / А. П. Тарков, К. Ю. Силкин // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геол. – 2000, № 3. – С. 197–205.

26. *Драгунов В. И.* Тектоническая карта структурно-формационных ярусов территории России. Масштаб 1 : 10 000 000. Объяснительная записка /

В. И. Драгунов, Б. А. Ермолаев. – СПб. : ВСЕГЕИ, 1996. – 12 с.

27. *Уайт Д. Э.* Возбуждение и распространение сейсмических волн / Д. Э. Уайт. – М. : Недра, 1986. – 261 с.

28. *Пузырев Н. Н.* Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн / Н. Н. Пузырев [и др.]. – М. : Недра, 1985. – 277 с.

29. *Tarkov A. P.* Layering of the lithosphere in the Voronezh crystalline massif from geophysical, geological and petrophysical data / A. P. Tarkov, N. S. Afanasiev, A. I. Dubyansky // Annales Geophysicae. – 1987. – V. 5B, № 3. – P. 267–272.

*Воронежский государственный университет
В. Н. Глазнев, заведующий кафедрой геофизики
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*

*Государственный научно-исследовательский
испытательный институт проблем технической
защиты информации ФСТЭК России*

*Д. О. Плаксин, старший научный сотрудник
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*

*Е. Ю. Дручек, научный сотрудник
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*

*Voronezh State University
V. N. Glaznev, head of the geophysical department
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*

*Federal survey of technical and export control.
State scientific-research and testing institute of the
problems of technical defense of the information*

*D. O. Plaksin, senior scientist
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*

*E. Yu. Druchek, research scientist
E-mail: glaznev@geol.vsu.ru*