



## ОЦЕНИВАНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ТЕХНОГЕННЫХ ВЗРЫВОВ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

**М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров, Г.М. Воскобойникова, Г.Ф. Седухина**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, Россия,  
e-mail: marat@opg.sccc.ru, sergey.avrorov@gmail.com, gulya@opg.sccc.ru, galya@opg.sccc.ru*

Предложен и экспериментально изучен новый подход к оцениванию опасных сейсмоакустических эффектов от техногенных взрывов (карьерных, полигонных и др.) с учетом влияния метеорологических и геологических условий на основе использования сейсмических вибраторов. Последние, как инструмент проведения экспериментальных работ, отвечают требованиям геоэкологической безопасности и высокой повторяемости результатов исследований.

*Карьерные взрывы, сейсмоакустические поля, геоэкологический риск, сейсмический вибратор, геолого- и метеословия*

### SEISMOACOUSTIC EFFECTS ESTIMATION OF TECHNOGENIC EXPLOSIONS BY MEANS OF SEISMIC VIBRATORS

**M.S. Khairtadinov, S.A. Avrorov, G.M. Voskoboinikova, G.F. Sedukhina**

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,  
630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Russia,  
e-mail: marat@opg.sccc.ru, sergey.avrorov@gmail.com, gulya@opg.sccc.ru, galya@opg.sccc.ru*

The authors propose a new method to estimate dangerous seismoacoustic effects from technogenic explosions (in opencast mines, firing grounds, etc.) taking into account the meteorological and geological conditions. The method uses seismic vibrators and meets the requirements of geological and environmental safety and provides high repeatability of the results.

*Quarry explosions, seismoacoustic fields, geoecological safety, seismic vibrator, meteorological and geological conditions*

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования геоэкологического воздействия разного типа техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных [Адушкин и др., 2000], полигонных [Авроров, Хайретдинов, 2010], подрывов старых запасов боеприпасов, от падающих ступеней ракет [Краснов и др., 2006] и др. – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру является весьма актуальной. Известно, что их основные геоэкологические эффекты связаны с сейсмическими и акустическими воздействиями, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов, воздушной ударной волны. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического влияния массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. Подобные явления рассматривались ранее [Адушкин и др., 2000]. В то же время следует отметить их слабую изученность от внешних причин – направления и силы ветра, температурной инверсии, состояния турбулентности атмосферы, а также рельефа окружающей местности. С учетом влияния отмеченных факторов возникает необходимость прогнозирования геоэкологического риска от техногенных взрывов. Это приводит к

необходимости дополнительных исследований физических эффектов распространения сейсмических и акустических волн. Целью настоящей работы является изложение методологического подхода к проведению подобных исследований и полученных экспериментальных результатов.

*Методологический подход*, предлагаемый в данной работе, базируется на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих намного меньшей мощностью по сравнению с ними. При этом достигается высокая экологическая чистота и повторяемость экспериментов. Это обусловлено высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками вибрационных источников [Алексеев и др., 2004].

Обоснованием использования предлагаемого подхода к прогнозированию с помощью сейсмических вибраторов является их способность порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания. Такая возможность данного класса источников доказана ранее теоретически и подтверждена многочисленными экспериментами [Глинский и др., 1999; Алексеев и др., 1996, 2004; Ковалевский, 2005; Заславский, 2007].

## ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ И ВЗРЫВОВ

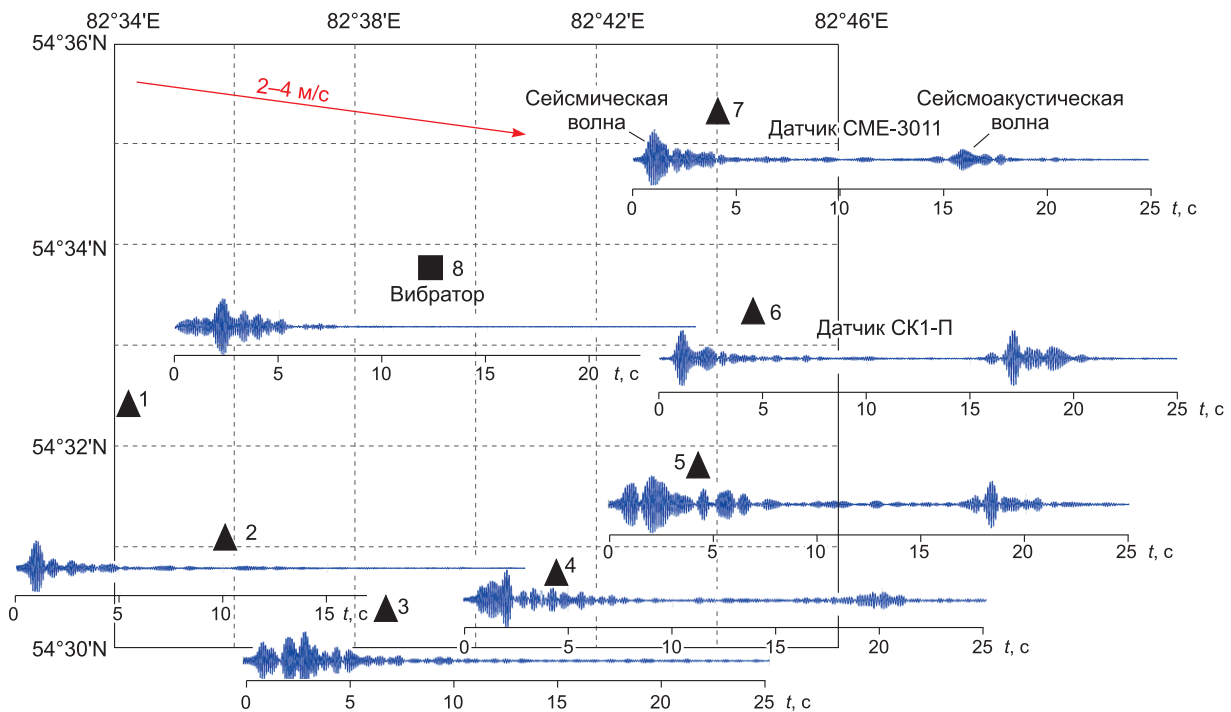
### 1. Эксперименты с сейсмическими вибраторами.

Ранее было показано, что сейсмические и акустические волны, порождаемые мощными вибраторами типа ЦВ-100, ЦВ-40, могут распространяться на десятки километров от источника благодаря эффекту акусто-сейсмической индукции, при которой акустическая волна возбуждает в Земле наведенную сейсмическую волну. При этом скорости обоих типов волн совпадают и равны скорости звука. С целью оценивания количественных эффектов влияния ветра на акустические колебания в районе Быстровского полигона была развернута сеть из автономных сейсмических станций “Байкал”, расставленных по кругу радиусом 6 км, в центре которого располагался вибратор ЦВ-40 (рис. 1). В качестве датчиков использовались трехкомпонентные сейсмоприемники типа СК1-П, СМЕ-3011, обозначенные треугольниками. Рисунок 1 иллюстрирует возможности одновременной регистрации сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора. Здесь в качестве сейсмограмм приведены вибрационные коррелограммы, получаемые как результат корреляционной свертки между опорным сигналом, повторяющим по форме зондирующий, и исходным [Алексеев и др., 2004]. Частотный диапазон зондирующих вибросейсмических сигналов занимает полосу 6–12 Гц. Полученные вибрационные коррелограммы являются аналогами импульсных сейсмограмм и иллюстрируют вступления волн сейсмических на времена прихода 0,96–1,05 с и акустических на времена прихода 16–19,5 с. Под последними подразумеваются сейсмические волны, регистрируемые на сейсмоматчиках по трем компонентам X, Y, Z

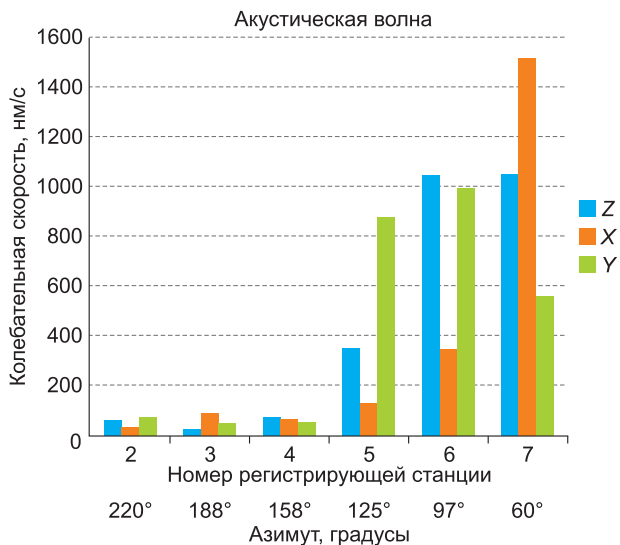
(СК1-П (см. рис. 1, № 4–6) и СМЕ-3011 (№ 7)) как результат проявления вышеупомянутого процесса акустосейсмической индукции. В дальнейшем такой тип волн будем называть *сейсмоакустическими*.

Как следует из рис. 1, сейсмоакустические волны хорошо выражены на сейсмограммах при условии совпадения направлений ветра и фронта распространения акустической волны (на схеме направление ветра показано стрелкой, сила ветра равна в данном случае 2–4 м/с). Такая особенность распространения акустических волн известна в акустике как явление роста эффективной скорости звука и уменьшения затухания при попутном ветре [Исакович, 1973]. В рассматриваемом примере на рис. 1 сейсмоакустические волны ярко выражены с подветренной стороны на датчиках 4, 5, 6, 7 и отсутствуют с противоположной, что определяет роль метеоусловий в дальнем распространении акустических волн. Количественные характеристики наблюдаемого эффекта могут быть охарактеризованы азимутальными гистограммами амплитуд сейсмоакустических волн, отражающими распределение последних в пространстве по отношению к направлению ветра.

Такие гистограммы, построенные относительно данного случая регистрации (см. рис. 1), приведены на рис. 2. Эти графики отражают особенности процессов взаимодействия физических полей разной природы: *сейсмических, акустических и метеорологических*. Количественно сейсмоакустический эффект как функция метеопараметров характеризуется значением углового сектора  $\theta$  и акустической энергией  $E_a$ , которая концентрируется в его пределах. Другим свойством является соотношение максимального  $A_{\max}$  и минимального  $A_{\min}$  уровней акустических волн в пределах сектора  $0-360^\circ$ , показывающее перераспределение



**Рис. 1.** Схема расстановки сейсмостанций “Байкал” с трехкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными по окружности радиусом 6 км. Приведены вибрационные коррелограммы, иллюстрирующие вступление сейсмических и сейсмоакустических волн по компоненте Z.



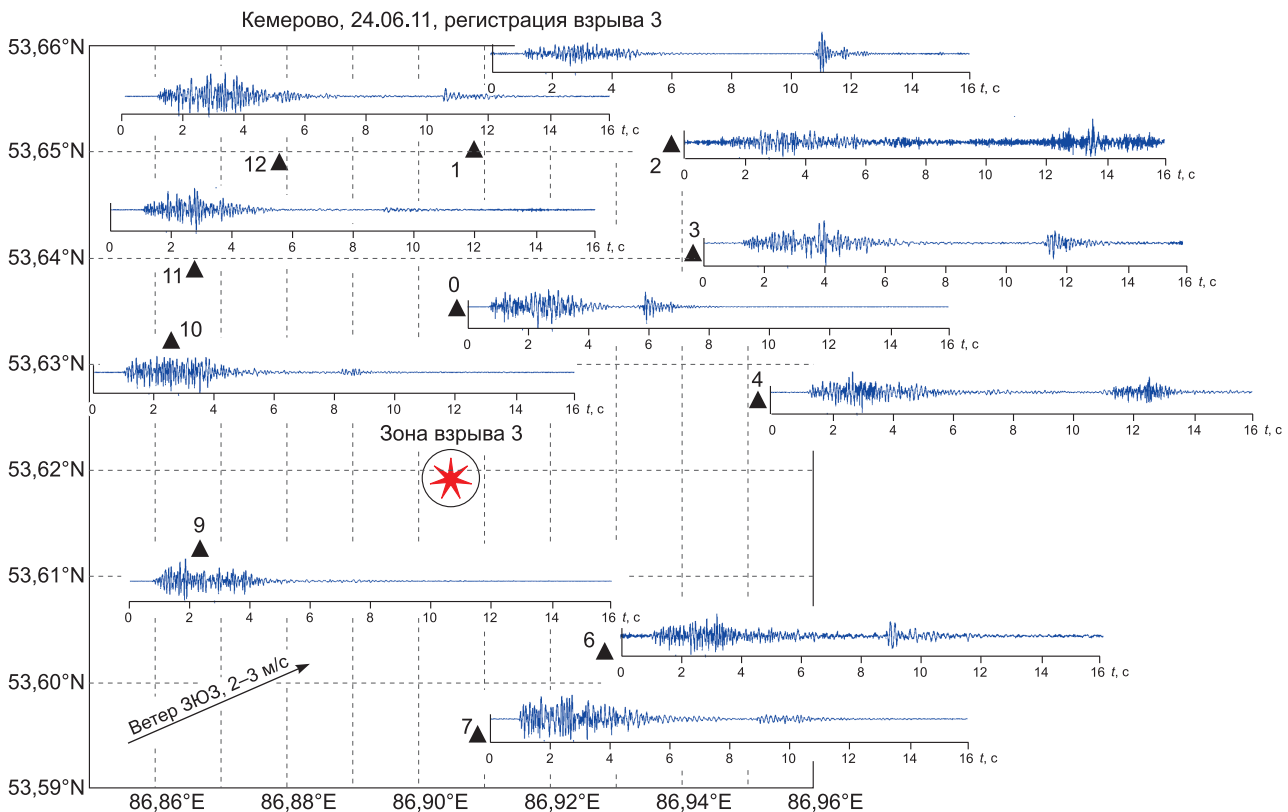
**Рис. 2.** Гистограммы амплитуд сейсмоакустических волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 с круговой расстановкой сейсмодатчиков с радиусом 6 км от источника.

энергии волн в пространстве. В частности, из рис. 2 следует, что сектор нарастания уровня сейсмоакустических волн при указанном направлении ветра и его скорости, равной 2–4 м/с, занимает около 60°. При этом перепад уровней волн  $A_{\max}/A_{\min}$  достигает в среднем 50. Эти данные следует рассматривать как резуль-

тат имитационного моделирования метеозависимого акустического эффекта при слабом ветре, который необходимо учитывать, оценивая геоэкологическую опасность взрывов для окружающей природной фауны и социальной инфраструктуры.

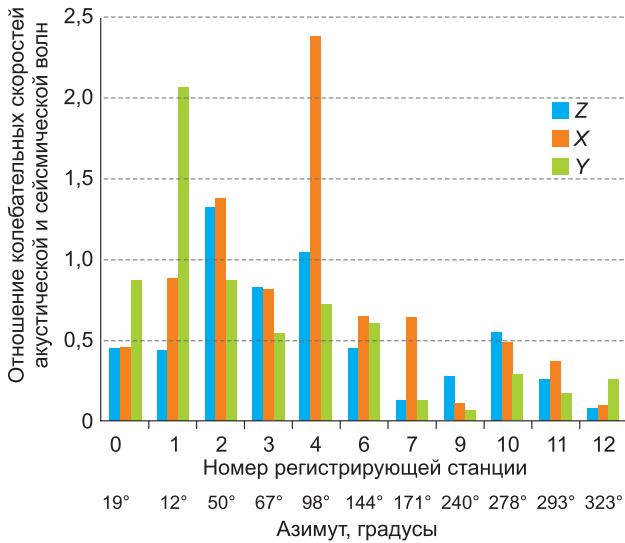
**2. Эксперименты с карьерными взрывами.** По аналогии с вибрационными экспериментами (см. рис. 1) изучалась ветровая зависимость сейсмоакустических волн, порождаемых карьерными взрывами в Кузбассе. В качестве примера на рис. 3 представлена схема регистрации такого взрыва (100 т взрывчатого вещества (ВВ)) на разрезе “Виноградовский”.

Пункты расстановки регистрирующей аппаратуры в виде мобильных сейсмостанций “Байкал” в комплексе с трехкомпонентными сейсмодатчиками GS-3С обозначены треугольниками под номерами 0–4, 6, 7, 9–12. Датчик с нулевым номером располагался непосредственно возле взрыва, обозначенного звездочкой. Направление ветра показано стрелкой. На рис. 3 представлены записи волн: сейсмических, сосредоточенных в диапазоне 0,5–1,1 с, и сейсмоакустических, в диапазоне 9–11,8 с. По аналогии с сейсмограммами от вибратора ЦВ-40 представленные записи отражают метеозависимый акустический эффект от карьерного взрыва: преобладающие сейсмоакустические волны регистрируются на датчиках 1–6, расположенных с подветренной стороны. Соответственно, на датчиках с наветренной стороны (датчики № 7–12) эти волны проявляются намного слабее либо вовсе отсутствуют. Количественное соотношение между уровнями сейсмоакустических и сейсмических волн  $P$  определяется гистограммой парных отношений, при-



**Рис. 3.** Сейсмоакустические записи карьерного взрыва для случая расстановки сейсмодатчиков с максимальным удалением 4,05 км от зоны взрыва.

Взрыв № 3 (24.06.2011, 19-19 GMT)  
Отношение колебательных скоростей  
акустической волны к сейсмической волне



**Рис. 4.** Гистограмма парных отношений амплитуд колебательных скоростей сейсмоакустических и сейсмических волн от карьерного взрыва с тротильным эквивалентом 60 т для расстановки сейсмодатчиков на рис. 3.

веденной на рис. 4. Здесь по оси абсцисс приводятся номера датчиков и соответствующие азимуты.

Как следует из рисунка, амплитуды сейсмоакустических волн могут превышать сейсмические в данном случае до четырех раз. Для данных условий проведения взрыва и регистрации угловой сектор нарастания первых составляет около 70°, а соотношение преобладающих и минимальных уровней волн достигает одного порядка.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что ветровое усиление акустических волн влечет за собой возрастание уровней поверхностных сейсмических волн, поскольку последние индуцируются акустическими волнами. По такой схеме взаимодействия может развиваться усиленный геоэкологический эффект акустического воздействия на окружающую среду.

**3. Оценивание геоэкологического воздействия сейсмоакустических волн от взрывов на окружающую среду.** Результаты экспериментов по выявлению метеозависимых акустических эффектов позволяют описать их с помощью функции направленности  $F(\theta)$ , которая может быть оценена по нарастанию уровней амплитуд волн в пределах заданного углового сектора. В этом случае правомочно говорить об эффекте фокусировки акустического излучения в пространстве. При этом акустическое давление, характеризующее воздействие воздушной волны, может быть представлено с учетом [Адушкин и др., 2000] в виде

$$P = 0,47KR^{-\frac{1}{5}}F(\theta), \quad (1)$$

где коэффициент  $K$  зависит от физико-механических свойств горных пород и возрастает от 0,5 до 1,5 при увеличении крепости пород;  $R = r/q^{\frac{1}{3}}$ , где  $r$  – эпицентрального расстояние от взрыва в метрах,  $q$  – масса взрывчатого вещества. В случае короткозамедленного

Таблица 1

**Допустимые акустические воздействия**

Охраняемый объект	Критическое значение удельной энергии $\epsilon_{кр}$ , Дж/м <sup>2</sup>	
	разрушительной	безопасной
Сейсмическая волна		
Здание жилое, взрыв однократный	2600	1000
Здание производственное, взрыв однократный		1500
Воздушная волна		
Оконное стекло толщиной 2–3 см	80	15
Взрывной шум (раздражающее действие)		
Человек		3

взрыва в ряде скважин в качестве величины  $q$  выбирается общая масса ВВ. Функция  $F(\theta)$  – фактор фокусировки, равный отношению азимутально зависимых функций акустических давлений с учетом ветра и без него. Имея в виду (1), метеозависимые эффекты распространения акустических волн от вибрационных источников в разном частотном диапазоне могут быть использованы для оценивания зональности сейсмоакустического геоэкологического воздействия на социальную инфраструктуру путем пересчета результатов измерений обоих полей к мощности взрывов.

Экологическое влияние карьерных взрывов оценивается *удельной плотностью энергии*:

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^T p^2(t) dt, \quad (2)$$

где  $\rho c$  – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см<sup>2</sup>·с);  $p(t)$  – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика;  $T$  – длительность акустической волны.

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными значениями удельной плотности энергии в единицах Дж/м<sup>2</sup>, приведенными в табл. 1. Для человека безопасной является величина  $\epsilon_{кр}$  до 3 Дж/м<sup>2</sup>.

Значение энергии волнового импульса рассчитывается по экспериментально полученным записям. В качестве примера ниже приводится оценка  $\epsilon_{кр}$  для взрыва массой 270 т, зарегистрированного в точке на удалении 6,8 км и на азимутальном направлении, соответствующем максимуму акустического давления. Регистрация акустической волны (акустограммы) осуществлялась с помощью пьезодатчика давления с коэффициентом преобразования  $K_A = 200$  мкВ/Па. В качестве примера на рис. 5 вверху приведен вид двух акустограмм. Первая запись получена без фильтрации, вторая – с применением вейвлет-фильтрации для устранения флуктуационных ветровых помех. Во втором случае использован вейвлет Добеши 16-го порядка, в качестве информативных выбраны уровни декомпозиции с 1 по 6 (значения коэффициентов остальных уровней обнулены) [Donoho, 1995]. С помощью данного вейвлет-фильтра исключается влияние ветровых помех на точность оценивания амплитуды

Разрез «Виноградовский», 11.10.2011, сравнение датчиков GS-3C и акустического

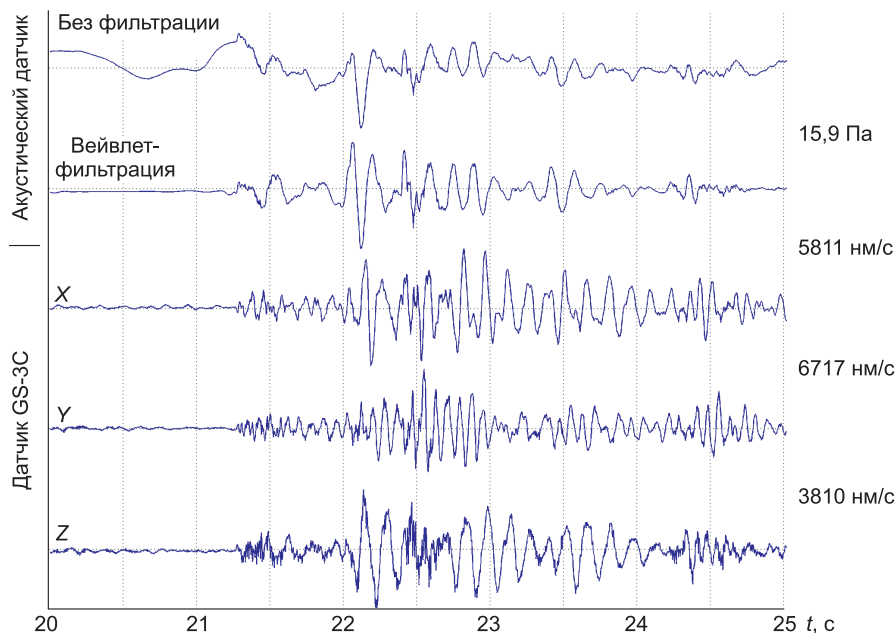


Рис. 5. Записи карьерного взрыва 270 т ВВ акустическим и сейсмическим датчиками (разрез “Виноградовский”) на удалении 6,8 км.

акустической волны. Максимум давления по фильтрованной записи акустограммы составил  $p_{\max} = 15,9$  Па. Для сравнения: аналогичное давление от вибратора ЦВ-40 на удалении 6 км (см. рис. 1) составило  $p = 0,013$  Па, т. е. более чем в 1000 раз меньше, чем от взрыва. Это доказывает экологическую чистоту данных приборов как инструментов для проведения экспериментальных исследований.

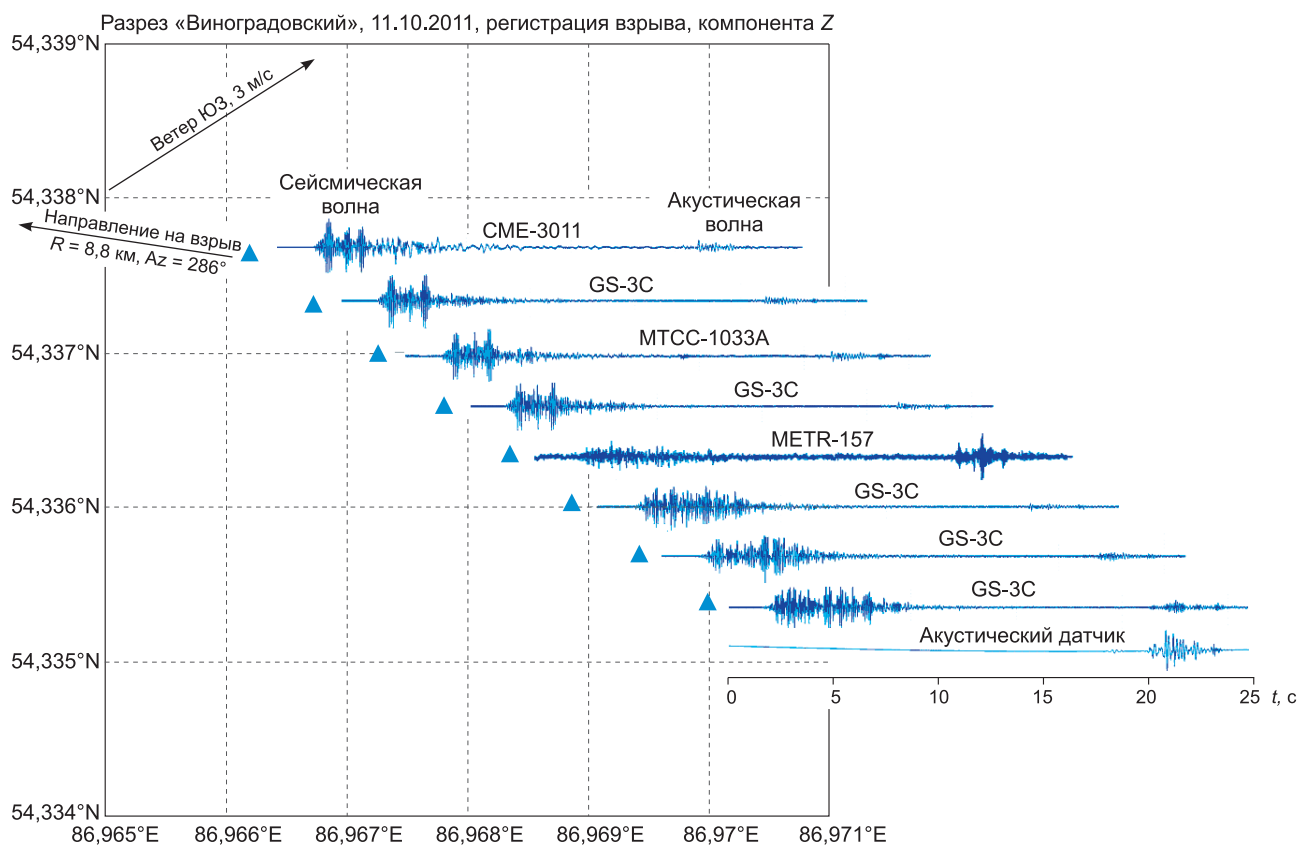
Значение удельной плотности энергии рассчитывалось согласно (2) с использованием записи акустограммы на участке существования акустической волны, равном 4 с. Полученная здесь оценка  $\epsilon_{кр}$  составила  $0,5$  Дж/м<sup>2</sup>, что в 6 раз ниже допустимой для человека (см. табл. 1).

Наряду с представлением записей акустических колебаний (акустограмм) на рис. 5 приведены записи сейсмоакустических колебаний на компонентах X, Y, Z от датчика GS-3C. Амплитуды этих волн представлены справа от графиков в значениях колебательной скорости (нм/с), для акустического датчика – в единицах давления (Па). Из приведенного рисунка отчетливо видна высокая коррелированность волновых форм колебаний, зарегистрированных на выходах акустического и сейсмического датчиков (максимум функции взаимной корреляции составляет 0,84 по компоненте Z). Это подтверждает тесную связь процессов распространения акустических и сейсмоакустических волн. Следует отметить их характер вступления (см. рис. 5): участок слабого вступления (21,3–22 с) сменяется вступлением мощного цуга на интервале 22–24,5 с. Это связано, по-видимому, с явлением интерференции короткозамедленных взрывов, которое отражает процесс синхронного сложения волн от пространственно распределенной группы излучателей в определенных областях окружающей сре-

ды и интервалах времени. В свою очередь это ведет к многократному усилению акустического и сейсмического эффектов. Их анализ требует дальнейшего рассмотрения.

Приведенные на рис. 5 сейсмоакустические волны являются частью полных сейсмограмм, представленных на рис. 6. Методика получения последних связана с изучением особенностей регистрации колебаний от взрывов разного типа датчиками. Описание ее приводится ниже.

**4. Сравнительная регистрация сейсмических и акустических колебаний датчиками линейных и угловых перемещений.** При регистрации сейсмоакустических волн от короткозамедленных карьерных взрывов изначально важным является выбор типа датчика в классе сейсмических, наиболее чувствительного к таким волнам. Для ответа на этот вопрос осуществлялась одновременная регистрация сейсмических и сейсмоакустических волн четырьмя различными сейсмическими датчиками: трехкомпонентным, колебательной скорости GS-3C (полоса регистрируемых частот – 10–150 Гц, коэффициент преобразования – 18 нВ/нм/с), а также молекулярно-электронными, один из которых является датчиком колебательной скорости СМЕ-3011 (полоса рабочих частот – 1–50 Гц, коэффициент преобразования – 400 нВ/нм/с), второй – скорости угловых перемещений типа МЕТР-157 (рабочий диапазон частот – 0,05–20 Гц, коэффициент преобразования – 50 В/рад/с), третий – линейных ускорений МТСС-1033А (0,1–100 Гц и 20 В/г соответственно). Молекулярно-электронные датчики являются разработкой Центра молекулярной электроники МФТИ. Под номером 1 использовался упомянутый выше акустический датчик. Расстановка перечисленных приборов осуществлялась на линейном профиле



**Рис. 6.** Записи сейсмических и акустических волн от карьерного взрыва массой 270 т на разного типа датчиках, расположенных вдоль линейного профиля с шагом 50 м.

с шагом 50 м (см. рис. 6). На схеме датчики обозначены треугольниками. Рядом с каждым из них представлены полная сейсмограмма взрыва по компоненте  $Z$  и тип прибора.

Как пример регистрации карьерного взрыва массой 270 т на рис. 6 приведены записи волн от перечисленных типов датчиков.

В результате из всех типов сейсмических приборов наиболее чувствительным к сейсмоакустическим волнам оказывается датчик угловых перемещений METR-157. Это связано с тем, что он более чувствителен к волнам с поляризацией, близкой к круговой, нежели датчики линейных перемещений. Именно такой поляризацией характеризуются сейсмоакустические волны [Глинский и др., 1999].

Для более детального анализа волновых форм колебаний, представленных на рис. 6, была выполнена их обработка в частотной и временной областях. Для сравнительного анализа были рассмотрены записи, полученные датчиками GS-3C и CME-3011. Амплитудные спектры сейсмических волн (в окне 2,8–5,68 с), зарегистрированных обоими типами датчиков по компонентам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , представлены на рис. 7. Верхние спектры относятся к GS-3C, нижние – к CME-3011.

Из анализа спектров следует, что основная энергия сейсмических волн концентрируется в областях 10 Гц и около 2 Гц. Из сравнения обоих видов спектров видно, что высокочастотный сейсмодатчик GS-3C

существенно ослабляет низкие частоты колебаний в сравнении с широкополосным сейсмодатчиком CME-3011. На основе данных частотного анализа осуществлено разделение исходной сейсмограммы (рис. 8, *а*), полученной на выходе GS-3C, на высоко- и низкочастотные компоненты с применением вейвлет-фильтрации. Результаты разделения представлены на рис. 8, *б* и 8, *в*. Такой подход был применен ко всем записям волн, полученным в результате регистрации взрыва восьмью трехкомпонентными датчиками GS-3C, расставленными на линейном профиле с шагом 50 м (см. рис. 6). Выделенные типы волн по скоростям распространения соответствуют  $P$  (см. рис. 8, *б*) и  $S$  (см. рис. 8, *в*). Скорость продольной волны  $P$  для данной местности на рассматриваемых удалениях по результатам профильной регистрации составляет 3500 м/с. Суммарная длительность пакета сейсмических волн от короткозамедленного взрыва составляет около 6 с (см. рис. 8, *а*). Сейсмоакустическая волна уверенно выделяется начиная с 20,2 с.

Компенсация провалов по уровню низкочастотных волн  $S$  (в области 2 Гц) с выходов датчиков GS-3C (см. рис. 7) осуществлялась выбором вейвлетов Добеши 18-го порядка [Авровов, Хайретдинов, 2010]. Результат выделения волны  $S$  представлен на рис. 8, *в*. Очевидно, что такой способ фильтрации позволяет эффективно компенсировать недостаток высокочастотного датчика по отношению к низкочастотным волнам.

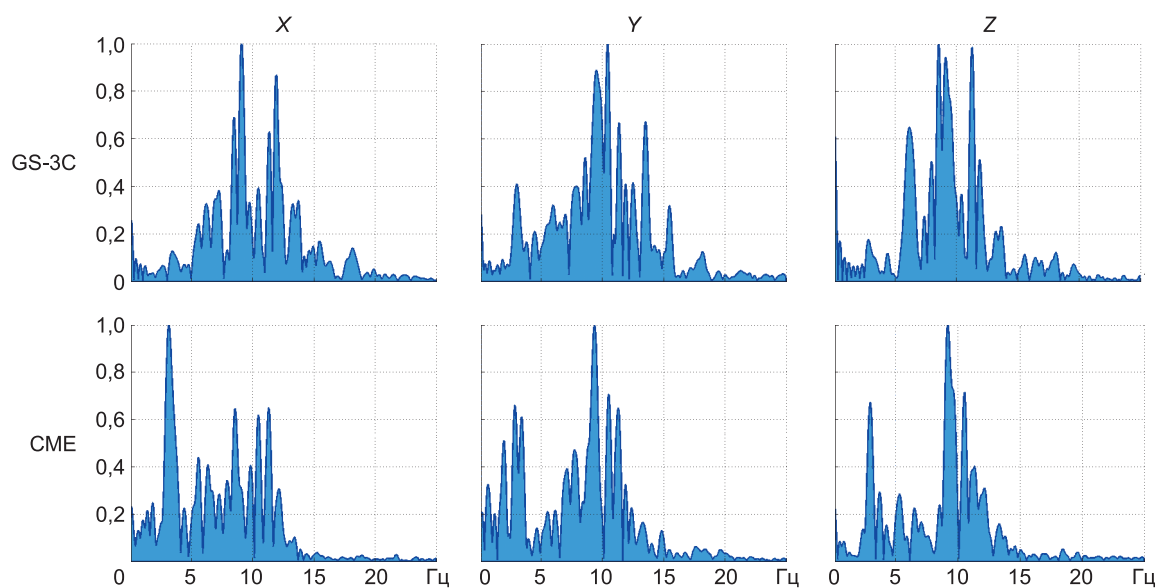


Рис. 7. Амплитудные спектры сейсмических волн от карьерного взрыва, зарегистрированных на удалении 6,8 км.

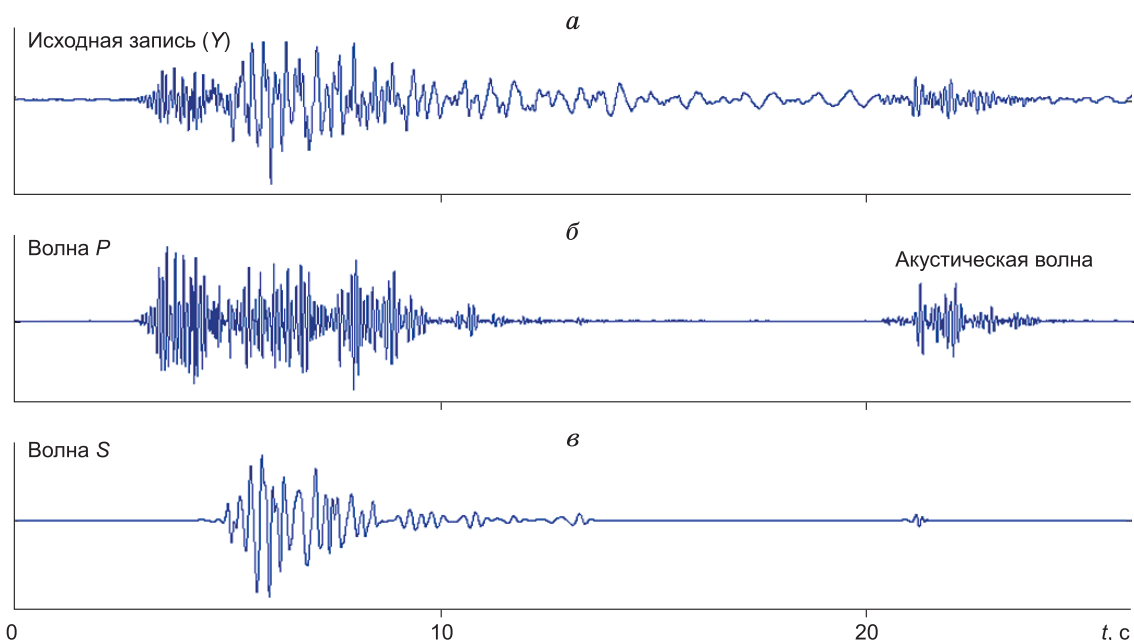


Рис. 8. Запись короткозамедленного карьерного взрыва сейсмодатчиком СМЕ-3011:

*a* – исходная запись; *б* – результат вейвлет-фильтрации волны *P* и сейсмоакустической волны (с вступлением на 20,2 с); *в* – результат вейвлет-фильтрации волны *S*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена и экспериментально реализована методика изучения влияния сейсмоакустических эффектов от техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных, полигонных и др. – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру. Предложенный подход основан на использовании сейсмических и акустических колебаний сейсмических вибраторов, отвечающих требованиям геоэкологической безопасности. Такие источники обладают высокими метрологическими силовыми и частотно-

временными характеристиками, что гарантирует высокую повторяемость результатов исследований. Это позволяет оценивать геоэкологические риски от взрывов в зависимости от гео- и метеоусловий и параметров взрывной технологии.

2. С помощью низкочастотных (типа ЦВ-40, ЦВ-100) и высокочастотных (СВ-10/100) вибраторов в комплексе с автономными сейсмическими станциями “Байкал” и короткопериодными трехкомпонентными сейсмодатчиками СК1-П и СМЕ-3011 измерены уровни сейсмических и сейсмоакустических колебаний с круговой расстановкой сейсмодатчиков

в пределах 0–360° по отношению к сейсмоисточнику. Выявлены эффекты фокусировки акустосейсмических колебаний в пространстве в зависимости от направления и силы ветра. Показано, что даже при слабом ветре 2–4 м/с соотношения максимальных и минимальных уровней акустических волн в зависимости от азимута могут достигать 50 раз и более, а сами акустические колебания сопоставимы по уровню с сейсмическими. Аналогичные эффекты были получены при регистрации карьерных взрывов в Кузбассе.

3. Показано, что ветровое усиление акустических волн влечет за собой возрастание уровней поверхностных сейсмических волн, поскольку последние индуцируются акустическими. По такой схеме взаимодействия полей разной природы может развиваться усиленный геоэкологический эффект воздействия на окружающую среду.

4. Получено, что из всех типов сейсмических датчиков наиболее чувствительными к сейсмоакустическим волнам, порождаемым карьерными взрывами, являются датчики скорости угловых перемещений (типа МЕТР-157 – разработка Центра молекулярной электроники МФТИ). Такая связь обусловлена характером поляризации рассматриваемых волн, близкой к круговой.

5. Доказано, что вейвлет-фильтрация является эффективным инструментом для разделения продольных, поперечных и акустических волн в сложном интерференционном поле короткозамедленных карьерных взрывов. Осуществлен анализ информативных вейвлетов.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 10-07-00387-а, 11-07-10000-к, 12-01-00773.*

## Литература

- Авроров С.А., Хайретдинов М.С.** Распределенная обработка данных в иерархических системах и сетях // Науч. вестн. НГТУ. 2010. № 2. С. 3–12.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П.** Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2000. № 6. С. 554–563.
- Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н.** Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. 1996. Т. 346, № 5. С. 664–667.
- Алексеев А.С., Геца Н.И., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И.** Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН; Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. 387 с.
- Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.** Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 431–441.
- Заславский Ю.М.** Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007. 200 с.
- Исакович А.М.** Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
- Ковалевский В.В.** Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами // Акустический журнал. 2005. Т. 51. С. 92–102.
- Краснов В.М., Дробжева Я.В., Маслов А.Н.** Акустическое поле на земле при взрыве ракеты-носителя // Вестн. НЯЦ. 2006. № 2. С. 79–85.
- Donoho D.L.** De-noising by soft thresholding // IEEE Trans. Inform. Theory. 1995. N 3. P. 613–627.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ХАЙРЕТДИНОВ Марат Саматович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН. Тел. (383) 330-87-43, e-mail: marat@opg.sccc.ru

**АВРОРОВ Сергей Александрович** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН. Тел. (383) 330-87-43, e-mail: sergey.avrorov@gmail.com

**ВОСКОБОЙНИКОВА Гюльнара Маратовна** – научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН. Тел. (383) 330-87-43, e-mail: gulya@opg.sccc.ru

**СЕДУХИНА Галина Федоровна** – научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН. Тел. (383) 330-87-43, e-mail: galya@opg.sccc.ru