

**ОЦЕНИВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ОТ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ
С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ**

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

**EVALUATING THE GEOECOLOGICAL RISK CAUSED BY THE MASS EXPLOSIONS
WITH SEISMIC VIBRATORS**

M. S. Khairatdinov, S. A. Avrorov, G. M. Voskoboinikova, G. F. Sedukhina

Работа выполнена в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS) при поддержке грантов РФФИ № 10-07-00387-а, № 11-07-10000-к, №12-01-00773-а.

Предложен и экспериментально изучен новый подход к оцениванию геоэкологических рисков от массовых техногенных взрывов (карьерных, полигонных и др.) с учетом влияния метео- и геологических условий на основе использования сейсмических вибраторов, отвечающих требованиям геоэкологической безопасности и высокой повторяемости результатов исследований.

The new method of estimating the dangerous seismoacoustic effects caused by technogenic explosions (in quarries, military ranges etc.) with the account meteo- and geological conditions based on the use of seismic vibrators, meeting the requirements of geoecological safety and high repeatability of results, is offered and experimentally studied.

Ключевые слова: карьерные взрывы, сейсмоакустические поля, геоэкологический риск, сейсмический вибратор, геолого-метео условия.

Keywords: quarry explosions, seismoacoustic fields, geoecological safety, seismic vibrator, geological and meteorological conditions.

Введение

Проблема прогнозирования геоэкологического воздействия разного типа массовых техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных [1, с. 554 – 563], полигонных [2, с. 3 – 12] – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру является весьма актуальной. Известно, что основные геоэкологические эффекты таких взрывов связаны с сейсмическими и акустическими воздействиями, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов, воздушной ударной волны. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического эффектов массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. Подобные эффекты ранее рассматривались рядом авторов [1]. В то же время следует отметить их слабую изученность от внешних факторов – 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. В данной работе упор сделан на изложение методологического подхода и результатов экспериментальных исследований по оцениванию ветровой зависимости эффектов распространения сейсмических и акустических волн от массовых взрывов.

Методологический подход к оцениванию геоэкологических эффектов от массовых взрывов, предлагаемый в данной работе, базируется на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих намного меньшей мощностью в сравнении с ними. При этом достигаются высокие экологическая чистота и повторяемость экспериментов в отличие от взрывов. Это обусловлено высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками вибрационных источников [3]. Протяженные зондирующие сигналы от вибраторов в пунктах приема сворачиваются в короткие корреляционные (вибрационные) сейсмограммы, являющиеся аналогами взрывных сейсмограмм.

Обоснованием к использованию предлагаемого подхода к прогнозированию с помощью сейсмических вибраторов являются два важных сейсмофизических феномена:

1. Эквивалентность сейсмических волновых полей, порождаемых взрывами и вибраторами. Это доказано экспериментально с использованием принципа взаимности «источник–приемник» [4, с. 28 – 34].

2. Способность вибраторов порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания. Такая способность данного класса источников доказана

ранее теоретически и многочисленными экспериментами [5 – 8].

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, совместно могут распространяться на десятки километров от источника [6, с. 422 – 431]. С целью оценивания количественных эффектов влияния ветра на распространение акустических колебаний в районе Быстровского полигона, была развернута сеть из автономных сейсмических станций «Байкал», составленных по кругу с радиусом 6 км, в центре которого располагается вибратор ЦВ-40 (рис. 1). В качестве датчиков использовались трехкомпонентные сейсμοприемники типа СК-1П, обозначенные на рисунке треугольниками. Рис. 1 иллюстрирует возможности одновременной регистрации сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора. Здесь в качестве результатов регистрации и обработки приведены вибрационные кореллограммы, получаемые как результат корреляционной свертки между опорным сигналом, повторяющимся по форме зондирующий сигнал, и зарегистрированным исходным сигналом. Получаемые при этом вибрационные кореллограммы являются аналогами импульсных сейсмограмм и иллюстрируют вступления сейсмических волн (волны первых вступлений) на временах прихода 0.96 – 1.05 с и акустических волн (вторичные волны) на временах прихода 16 – 19.5 с. Под последними подразумеваются сейсмические волны, регистрируемые на сейсmodатчиках как результат проявления процесса акустосейсмической индукции, развивающейся в приповерхностном волноводе [5, с. 664 – 667; 8, с. 92 – 102]. Сущность его состоит в том, что распространяющаяся вдоль дневной поверхности Земли акустическая волна возбуждает поверхностную сейсмическую волну (волну наведенной сейсмичности), скорость распространения которой совпадает со скоростью акустической волны. Соответственно, такая волна регистрируется сейсмическими датчиками по 3 компонентам X, Y, Z. 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 рисунке направление и сила ветра показаны стрелкой и равны 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 [9].

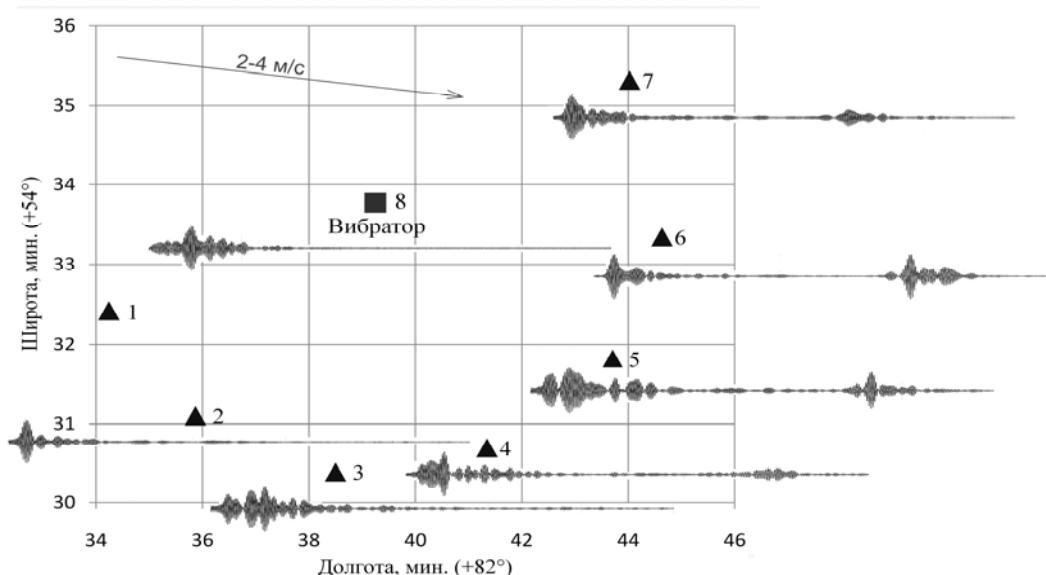


Рис. 1. Схема расстановки сейсмостанций «Байкал» с трехкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными по окружности радиусом 6 км. Приведены вибрационные кореллограммы, иллюстрирующие вступление сейсмических и сейсмоакустических волн. Стрелкой показано направление ветра

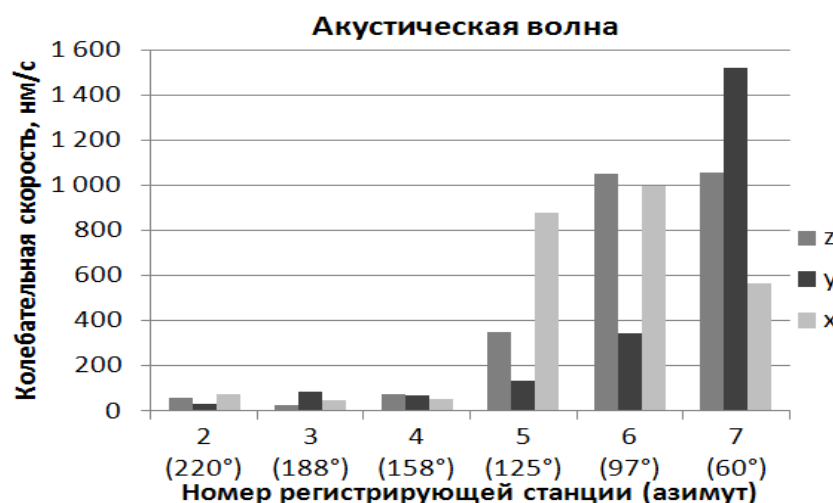


Рис. 2. Гистограммы амплитуд сейсмоакустических волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 с круговой расстановкой сейсмодатчиков с радиусом 6 км от источника

В рассматриваемом случае 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. При этом важными являются количественные характеристики вариаций уровней волн с учетом метеоусловий. Они могут быть охарактеризованы азимутальными гистограммами амплитуд сейсмоакустических волн, отражающими распределение последних в пространстве по отношению к направлению ветра. Такие гистограммы, построенные по отношению к рассматриваемому случаю регистрации (рис. 1), приведены на рис. 2. По оси абсцисс здесь представлены номера датчиков с соответствующими азимутами в градусах.

Подобная гистограмма отражает особенности процессов взаимодействия физических полей разной природы: сейсмических, акустических и метеорологических. Количественно акустический эффект как функция

метеопараметров характеризуется значением углового сектора θ и акустической энергией E_a , которая концентрируется в его пределах. Другой характеристикой является соотношение максимального A_{\max} и минимального A_{\min} уровней акустических волн в пределах сектора в 360 град., характеризующее перераспределение энергии акустических волн в пространстве. Очевидно, что эти параметры, в свою очередь, сложным образом зависят от ряда таких факторов, как мощность источника, направление и сила ветра, явление температурной инверсии, турбулентность атмосферы, сложность рельефа местности и др. В частности, из рис. 2 следует, что сектор нарастания уровня сейсмоакустических волн при указанных на рис. 1 направлении и силе ветра 2 – 4 м/сек занимает около 60 град. При этом перепад уровней волн A_{\max}/A_{\min} достигает в среднем 50 раз. Приведенный результат следует рассматривать как результат имитационного моделирования, показывающий, что метеозависимый акустический эффект даже от слабого

ветра необходимо учитывать при оценивании геоэкологической опасности взрывов для окружающей природной и социальной инфраструктуры.

2. *Эксперименты с карьерными взрывами.* По аналогии с экспериментами с вибратором (рис. 1) изучалась ветровая зависимость сейсмоакустических волн,

порождаемых карьерными взрывами Кузбасса. В качестве примера на рис. 3 представлена схема регистрации карьерного взрыва массой взрывчатого вещества (ВВ) 100 т на разрезе «Виноградовский».

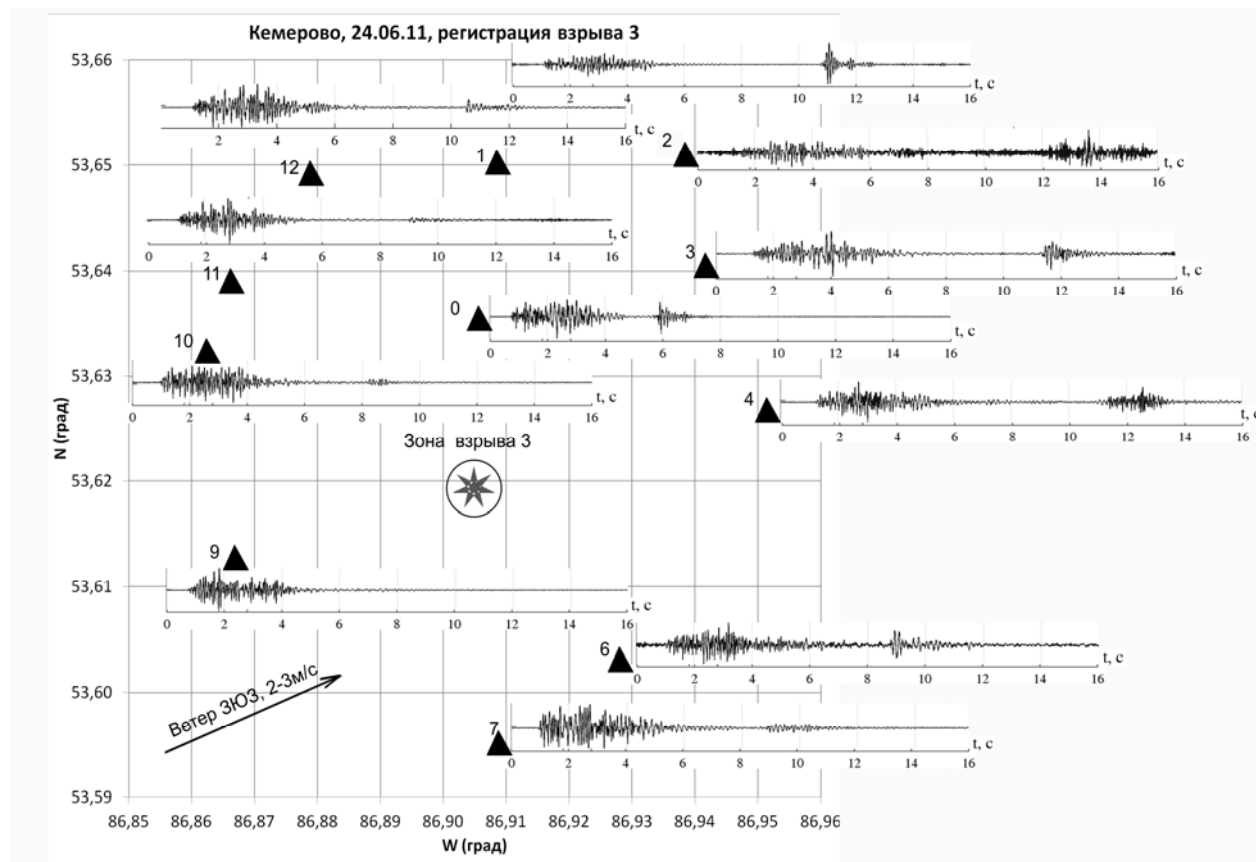


Рис. 3. Сейсмоакустические записи карьерного взрыва для случая круговой расстановки сейсмодатчиков. Датчики помечены треугольниками. Место взрыва обозначено звездочкой. Направление ветра показано стрелкой

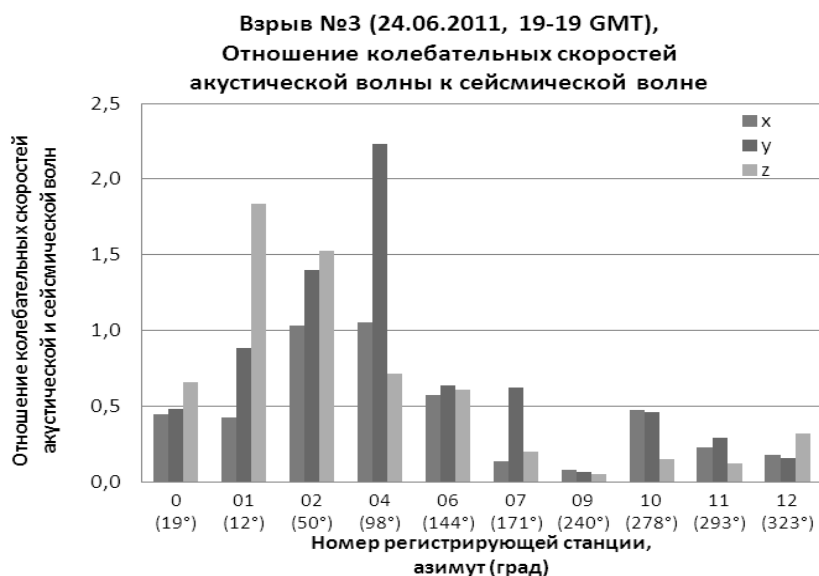


Рис. 4. Гистограммы парных соотношений амплитуд сейсмоакустических и сейсмических волн от карьерного взрыва с тротиловым эквивалентом 60 т для случая круговой расстановки сейсмодатчиков относительно источника

На схеме пункты расстановки регистрирующей аппаратуры в виде мобильных сейсмостанций «Байкал» в комплексе с трехкомпонентными сейсмодатчиками GS-3C обозначены треугольниками под номерами 0 – 12. Датчик под нулевым номером располагался непосредственно возле взрыва. Место взрыва обозначено звездочкой. Как результат регистрации, на рис. 3 представлены записи головных (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 волны отражают метеозависимый акустический эффект от карьерного взрыва: преобладающие сейсмоакустические волны регистрируются на датчиках 1 – 6, расположенных с подветренной стороны по отношению к взрыву. Соответственно, на датчиках с наветренной стороны (датчики №№ 7 – 12) эти волны проявляются намного слабее либо вообще отсутствуют. Количественное соотношение между уровнями сейсмоакустических и сейсмических волн P определяется гистограммой парных отношений, приведенной на рис. 4. Здесь по оси абсцисс приводятся номера датчиков и их соответствующий азимут.

Как следует из рисунка, сейсмоакустические волны по уровню могут превышать сейсмические, в рассматриваемом случае до 2-х раз. Для данных условий проведения взрыва и регистрации угловой сектор нарастания акустических волн составляет около 70 град, а соотношение преобладающих и минимальных уровней акустических волн достигает одного порядка.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что ветровое усиление акустических волн влечет за собой возрастание уровней поверхностных сейсмических волн, поскольку последние, как показано в [6], индуцируются акустическими волнами. По такой схеме взаимодействия волн может развиваться усиленный геоэкологический эффект сейсмоакустического воздействия на окружающую среду.

3. *Оценивание геоэкологического воздействия сейсмоакустических волн.* Результаты экспериментов по выявлению метеозависимых акустических эффектов позволяют описать их с помощью функции направлен-

ности $F(\theta)$, которая может быть оценена по функции нарастания уровней акустических волн в пределах заданного углового сектора. В этом случае правомочно говорить об эффекте фокусировки акустосейсмических колебаний по пространству. Тогда акустическое давление, характеризующее воздействие воздушной волны, может быть представлено с учетом [1] в виде:

$$P = 0.47K \cdot R^{-1/5} \cdot F(\theta), \quad (1)$$

где коэффициент K зависит от физико-механических свойств горных пород и возрастает от 0.5 до 1.5 при увеличении крепости пород; $R = r/q^{1/3}$, где r – абсолютное эпицентральное расстояние от взрыва в метрах, q – масса заряда взрывчатого вещества (ВВ). В случае короткозамедленного взрыва большого числа скважин в качестве величины q выбирается масса ВВ в группе скважин.

С учетом приведенного соотношения метеозависимые эффекты распространения акустических волн от вибрационных источников в разном частотном диапазоне могут быть использованы для оценивания зональности сейсмоакустического геоэкологического воздействия на социальную инфра-структуру путем пересчета результатов измерений обоих полей к мощности взрывов.

Экологическое воздействие карьерных взрывов оценивается *удельной плотностью энергии*:

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

Здесь ρc – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см²·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/м², приведенными в таблице 1. Как видно из таблицы, для человека безопасной является величина удельной плотности энергии до 3 Дж/м².

Таблица 1

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

Значение энергии волнового импульса рассчитывается по экспериментально полученным записям. В качестве примера ниже приводится оценка удельной плотности энергии для взрыва массой 270 т, зарегистрированного в точке на удалении 6.8 км и в азимутальном направлении, соответствующем максимуму акустического давления. Акустическая волна (акустограмма) от взрыва регистрировалась с помощью пьезо-

датчика давления с коэффициентом преобразования $K_A = 200$ мкВ/Па.

В качестве примера на рис. 5 приведен вид такой акустограммы, представленной двумя верхними записями. Первая запись получена без фильтрации, вторая – с применением вейвлет-фильтрации для устранения флуктуационных ветровых помех.

Оценка максимума давления составила $p_{\max}=15.9$ Па. Для сравнения акустическое давление от вибратора ЦВ- 40 на удалении 6 км (рис. 1) составило $p=0.013$ Па, т. е. в 1223 раз меньше, чем от взрыва. Это доказывает экологическую чистоту вибраторов как инструментов для проведения экспериментальных исследований. Значение удельной плотности энергии рассчитывалось

согласно (2) с использованием записи акустограммы на участке существования акустической волны, равной 4 с. Полученная здесь оценка удельной плотности энергии составила 0.5 Дж/м^2 , что в 6 раз ниже допустимой для человека (таблица 1).

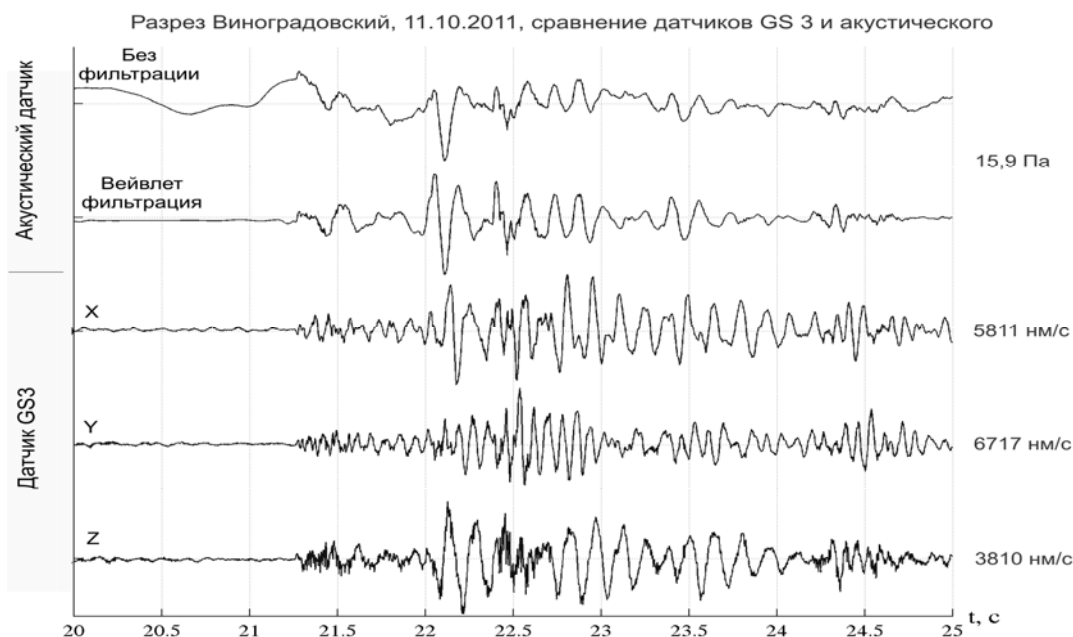


Рис. 5. Записи карьерного взрыва (разрез «Виноградовский») массой 270 т на удалении 6.8 км

Два верхних графика (рис. 5) соответствуют акустограммам, зарегистрированным с помощью акустического датчика, три нижних графика соответствуют сейсмограммам, зарегистрированным трехкомпонентным сейсмодатчиком GS-3C по компонентам X, Y, Z. Справа от записей приводятся амплитудные значения волн, представленные в единицах колебательной скорости (нм/с), для акустического датчика – в единицах давления (Па).

Следует отметить характер вступления акустических волн, представленный на рис. 5: участок слабого вступления (21.3 – 22) с сменяется вступлением мощного цуга на интервале 22 – 24.5 с. Это отражает явление интерференции короткозамедленных взрывов, которое может приводить к многократному усилению акустического и сейсмического эффектов.

Три нижние записи на рис. 5 отражают вступления сейсмических волн по компонентам X, Y, Z от датчика GS-3C. Амплитуды этих волн представлены справа от графиков в значениях колебательной скорости (нм/с). Из приведенного рисунка отчетливо видна коррелированность (максимум функции взаимной корреляции составляет 0,55 по компоненте Z) последних с акустической волной, что свидетельствует об их тесной природе распространения.

Заключение

Предложена и экспериментально реализована методика изучения влияния сейсмоакустических эффектов от массовых техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных, полигонных и др. – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру. Подход основан на использовании сейсмических и акустических колебаний сейсмических вибраторов, отвечаю-

щих требованиям геоэкологической безопасности. Такие источники гарантирует высокую повторяемость результатов исследований в отличие от взрывов. Это позволяет оценивать геоэкологические риски от взрывов в зависимости от гео- и метеоусловий и параметров взрывной технологии с учетом масштабного пересчета.

Результатами экспериментов показано, что существующие на сегодня низко- и высокочастотные типы сейсмических вибраторов и компактные автономные сейсмостанции типа «Байкал» в комплекте с трехкомпонентными малогабаритными сейсмодатчиками типа GS-3C позволяют регистрировать сейсмоакустические волны в диапазоне частот от 5 до 100 Гц. Это позволяет с необходимой детальностью изучать особенности распространения волн в районах вибросейсмических полигонов и промышленных карьеров в широком спектре частот и на разных азимутальных направлениях с учетом геолого- и метеоусловий и параметров взрывной технологии.

На основе экспериментов выявлены эффекты фокусировки акустосейсмических колебаний по пространству и интерференции во времени, многократно усиливающие геоэкологическое воздействие массовых взрывов на окружающую среду. В частности, показано, что даже при слабом ветре 2 – 4 м/с соотношения максимальных и минимальных уровней акустических волн в зависимости от азимута достигают 50 и более раз, а сами акустические воздействия сопоставимы с сейсмическими. Наблюдающееся в экспериментах явление интерференции короткозамедленных взрывов во времени и пространстве, приводящее к 5-кратному и более усилению сейсмоакустических волн, дополнительно усиливает разрушительное воздействие последних.

Литература

1. Адушкин, В. В. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах / В. В. Адушкин, А. А. Спивак, С. П. Соловьев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2000. – № 6.
2. Авроров, С. А. Распределённая обработка данных в иерархических системах и сетях / С. А. Авроров, М. С. Хайретдинов // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – № 2.
3. Алексеев, А. С. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А. С. Алексеев, Н. И. Геза, Б. М. Глинский и др.; отв. ред. Г. М. Цибульчик. – Новосибирск: Гео, 2004. – 387 с.
4. Глинский, Б. М. Экспериментальные исследования по калибровке сейсмических трасс в Западной Сибири и Алтае-Саянском регионе / Б. М. Глинский, А. Ф. Еманов, В. В. Ковалевский и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 2 (18).
5. Алексеев, А. С. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании / А. С. Алексеев, Б. М. Глинский, С. И. Дряхлов и др. // Доклады АН. – 1996. – Т. 346. – N. 5.
6. Glinskii, B. M. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes / B. M. Glinskii, V. V. Kovalevskii, M. S. Khairtdinov // Geology and Geophysics. – 1999. – Vol. 40. – No. 3.
7. Заславский, Ю. М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками / Ю. М. Заславский. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. – 200 с.
8. Ковалевский, В. В. Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами / В. В. Ковалевский // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51.
9. Исакович, А. М. Общая акустика / А. М. Исакович. – М.: Наука: Физматлит, 1973. – 496 с.

Информация об авторах:

Хайретдинов Марат Саматович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 8(383)330-87-43, marat@opg.sccc.ru.

Khairtdinov Marat Samatovich – Doctor of Technical Science, Professor, chief researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk.

Авроров Сергей Александрович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 8(383)330-87-43, sergey.avrorov@gmail.com.

Avrarov Sergey Alexandrovich – Candidate of Technical Science, junior researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk.

Воскобойникова Гюльнара Маратовна – научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 8(383)330-87-43, gulya@opg.sccc.ru.

Voskoboinikova Gyl'nara Maratovna – researcher at the the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk.

Седухина Галина Фёдоровна – научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 8(383)330-87-43, galya@opg.sccc.ru.

Sedukhina Galina Fedorovna – researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk.