

ЭКОЛОГООХРАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

В. В. Ковалевский, М. С. Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

630090, Новосибирск, Россия

УДК 622.271:351.77

Приведены результаты экспериментальных исследований и численного анализа разработанного авторами оригинального подхода к оцениванию геоэкологических рисков, экологически безопасного с точки зрения воздействия массовых мощных взрывов на окружающую среду. Подход основан на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих в сравнении с ними намного меньшей мощностью. Такие источники обладают способностью возбуждать в среде одновременно сейсмические и акустические колебания (вибро-сейсмоакустические колебания) с прецизионными метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует, в отличие от взрывов, высокую воспроизводимость результатов исследований.

Ключевые слова: сейсмический вибратор, акустосейсмические поля, метеозависимые эффекты, мощные взрывы, геоэкологические риски.

In article results of experimental researches and the numerical analysis of original *ecologically safe approach*, developed by authors to estimation of geoeological risks for environment from influence of mass powerful explosions are resulted. The approach is based on application of seismic vibrators as the sources simulating explosions, but possessing in comparison by them much smaller power. Such sources possess ability to raise in the environment simultaneously seismic and acoustic oscillations with precision metrological power and time-and-frequency characteristics that guarantees, unlike explosions, high reproducibility of results of researches.

Key words: seismic vibrator, acoustoseismic fields, meteodependent effects, powerful explosions, geoeological risks.

Введение. Зарождение и развитие новых вибрационных геотехнологий непосредственно связано с именем академика А. С. Алексеева. Под его руководством были разработаны теоретические и методические основы таких востребованных для науки и практики направлений, как многодисциплинарный прогноз землетрясений [1], вибросейсмическая калибровка сейсмических трасс и сейсмостанций с целью повышения точности определения координат ядерных взрывов и землетрясений [2, 3], вибрационное повышение нефтеотдачи [4], вибросейсмическая томография сейсмоопасных зон [5] и др. Технической основой создания новых геотехнологий

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов № 10-07-00387-а , № 11-07-10000-к, № 12-01-00773) и гранта НГТУ – СО РАН № С1-20.

явилась разработка ряда мощных низкочастотных управляемых вибраторов, обладающих прецизионными силовыми и частотно-временными характеристиками. При сравнительно малой по сравнению со взрывами мощности излучения указанные параметры источников позволяют получить энергетические эффекты, сравнимые со взрывами, с помощью применения методов накопления сейсмических колебаний. Такой подход лежит в основе вибросейсмического метода просвечивания Земли [6, 7], обеспечивающего высокие экологическую чистоту и прецизионность экспериментальных работ. Благодаря технологичности рассматриваемого метода, круг вибрационных технологий, построенных на его основе, продолжает расширяться и развиваться. Это также возможно благодаря тому, что одновременно с излучением основных сейсмических колебаний сейсмические вибраторы излучают акустические и электромагнитные волны, распространяющиеся в атмосфере на расстояния до сотен километров [8]. В связи с этим открываются возможности использования вибраторов для изучения процессов сопряженного распространения полей разной физической природы.

В данной работе такие возможности рассматриваются в связи с проблемой прогнозирования геоэкологических рисков для окружающей природной среды и социальной инфраструктуры от воздействия разного типа техногенных и естественных взрывов. К числу первых, в частности, относятся короткозамедленные карьерные взрывы [9], массовые взрывы, связанные с уничтожением утилизируемых запасов боеприпасов [10], взрывы от падающих ступеней ракет [11] и др. К числу мощных природных взрывоподобных событий в первую очередь следует отнести землетрясения, извержения магматических и грязевых вулканов [12], горные удары [13], падения небесных тел и др.

Известно, что основные геоэкологические эффекты взрывов связаны с образованием ударных воздушных и подземных сейсмических волн, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического эффектов массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. Подобные эффекты рассматривались ранее [9]. В тоже время следует отметить слабую изученность их зависимости от внешних метеофакторов – направления и силы ветра, температурной инверсии, состояния турбулентности атмосферы, а также рельефа и ландшафта окружающей местности. Это тем более важно, поскольку влияние их может приводить к многократному усилению разрушительного экологического воздействия взрывов на окружающую среду. С учетом влияния отмеченных факторов возникает необходимость *прогнозирования* геоэкологического риска от мощных взрывов, что приводит к необходимости дополнительных исследований физических эффектов распространения сейсмических и акустических волн от массовых взрывов. Целью настоящей работы является изложение методологического подхода к проведению подобных исследований и полученных при этом экспериментальных и численных результатов. Такой подход 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, что обусловлено высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками вибрационных источников [5].

1. Акустосейсмические эффекты от сейсмических вибраторов и взрывов.



Рис. 1. Вибрационный источник ЦВ-40

Метеозависимые физические эффекты в экспериментах с сейсмическими вибраторами. Ранее было показано, что сейсмические и акустические волны порождаются как мощными сейсмическими вибраторами типа ЦВ-100, ЦВ-40, так и маломощными, типа СВ-10/100. На основе численного анализа и обработки данных натуральных экспериментов изучены закономерности совместного распространения обоих типов волн до сотен километров от мощных источников. Главная особенность рассматриваемого распространения связана с эффектом акустосейсмической

индукции, при которой распространяющаяся в приземном волноводе акустическая волна возбуждает в Земле поверхностную сейсмическую волну, которая, соответственно, может быть зарегистрирована сейсмическими датчиками [6, 12, 13]. В дальнейшем такую волну будем называть акустосейсмической. При этом скорости обоих типов волн совпадают и равны скорости распространения инфразвука. Ниже приводятся результаты экспериментов по изучению ветрозависимых эффектов распространения акустосейсмических волн от сейсмического вибратора центробежного типа ЦВ-40 (рис. 1).

С целью оценивания количественных эффектов влияния ветра на распространение акустических колебаний в районе вибросейсмического полигона (пос. Быстровка Новосибирской обл.) была развернута сеть из автономных сейсмических станций "Байкал", расставленных по окружности с радиусом 6 либо 12 км (рис. 2). В центре окружности располагается вибратор ЦВ-40.

На рис. 2 в качестве результатов регистрации и обработки приведены вибрационные коррелограммы, получаемые как результат корреляционной свертки между опорным сигналом, повторяющим по форме зондирующий сигнал, и зарегистрированным исходным сигналом

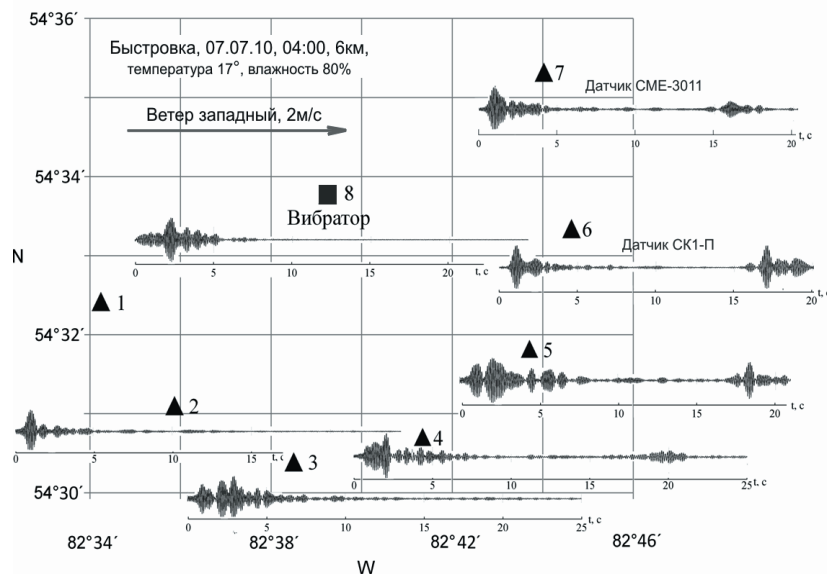


Рис. 2. Схема расстановки сейсмостанций "Байкал" с трехкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными по окружности радиусом 6 км. Приведены вибрационные коррелограммы, иллюстрирующие вступления сейсмических и акустических волн. Стрелкой показано направление ветра

$$\bar{r}(m) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \sum_{n=0}^{N-1} x_n^{(i)} \cdot S_{n-m}, \quad m = 0, \dots, M-1; \quad i = 1, \dots, L,$$

где M – число дискретных отсчетов вибрационной сейсмограммы, L – число усреднений, N – множество дискретных отсчетов регистрируемого входного сигнала $x_n = x(t_n)$, $S_n = S(t_n)$ – опорный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) вида $S(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + \beta t^2 / 2)$, параметрами которого являются $a(t)$ – огибающая, f_0 – начальная частота развертки, β – скорость развертки по частоте, равная $\beta = (f_{\max} - f_0) / T$, где f_{\max} – максимальная частота, T – длительность развертки.

При проведении экспериментов за основу были выбраны следующие величины: $f_0 = 6,25$ Гц, $f_{\max} = 11,23$ Гц, $T = 2850$ с.

Полученные вибрационные коррелограммы 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 сейсмодатчиках как результат проявления вышеупомянутого процесса акустосейсмической индукции. Такие волны, называемые акустосейсмическими, в экспериментах регистрировались сейсмическими датчиками типа СК1-П № 4–6 и СМЕ-3011 (№ 7) по трем компонентам X , Y , Z . Как следует из рис. 2, акустосейсмические волны хорошо выражены на сейсмограммах при условии совпадения направлений ветра и фронта распространения акустической волны. На рис. 2 направление и сила ветра показаны стрелкой и равны в данном случае 2–4 м/с. Отмеченная особенность распространения акустических волн известна в акустике как явление роста эффективной скорости звука и уменьшения затухания при попутном ветре [16]. Это определяет роль метеоусловий в дальнем распространении акустических волн. Зарегистрированный эффект направленности акустического волнового поля поддается строгому количественному оцениванию в экспериментах с вибратором в вариантах круговой расстановки датчиков по отношению к источнику. Соответствующие этому эффекту графики диаграммы направленности (ДН) волнового поля в пределах азимутов $-180 \div +180^\circ$ для указанных вариантов расстановки представлены на рис. 3. Здесь нулевой азимут соответствует направлению ветра. По оси ординат представлены значения акустического давления в паскалях, соответствующие заданным азимутальным направлениям. Эффект направленности может быть количественно охарактеризован шири-

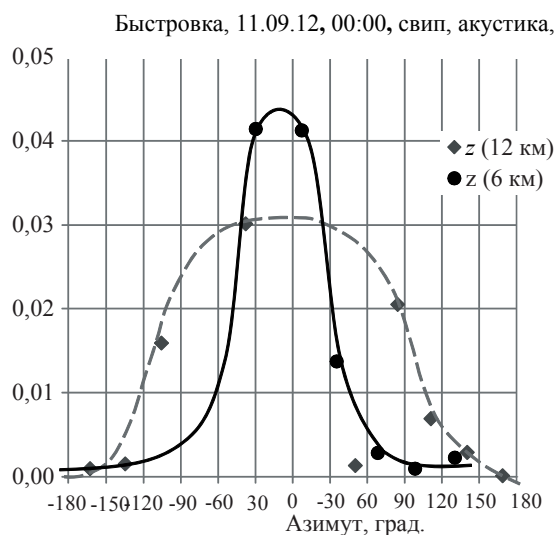


Рис. 3. Графики зависимости акустического давления от азимута в зависимости от ветра при регистрации колебаний от вибратора ЦВ-40. Сплошная линия – случай круговой расстановки датчиков с радиусом 6 км при скорости ветра 2–4 м/с; пунктирная линия – 12 км и 4–6 м/с соответственно

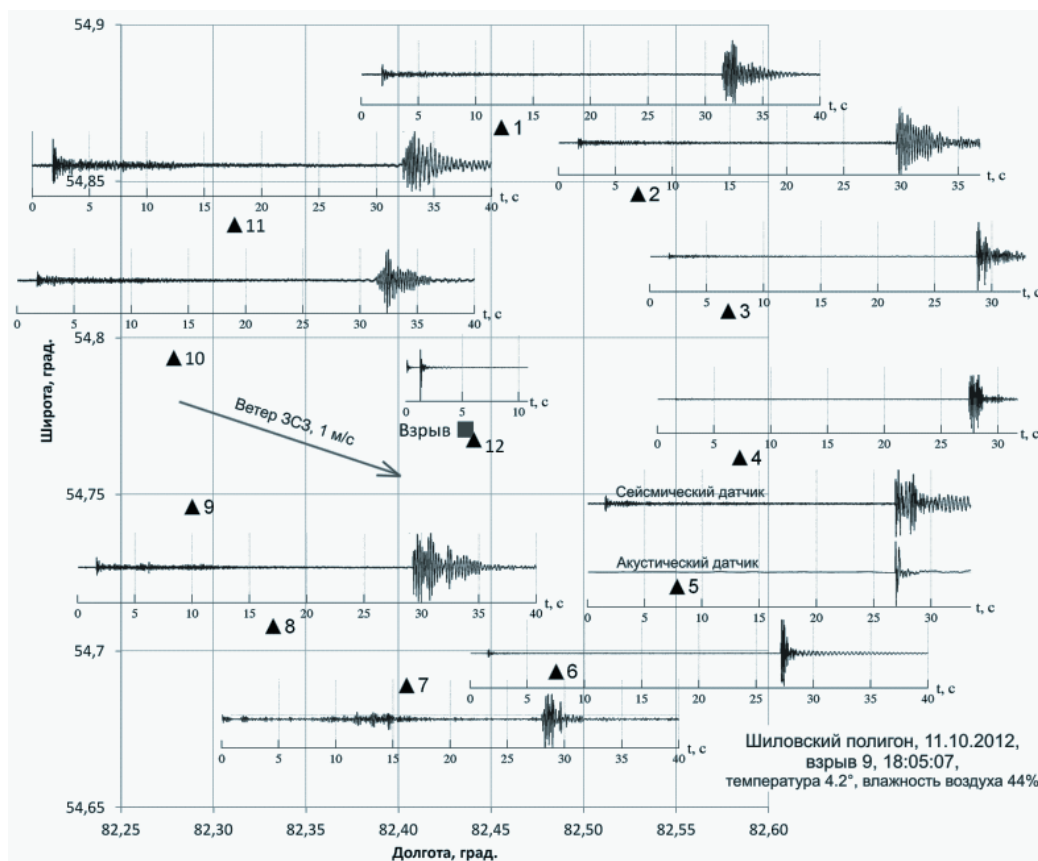


Рис. 4. Схема регистрации полигонного взрыва мощностью 125 кг в тротиловом эквиваленте.

Треугольниками обозначено расположение регистраторов "Байкал" совместно с трехкомпонентными датчиками GS-3, размещенными по окружности радиуса 10 км под номерами 1-11. Точка 12 – контрольная точка. Приведены сейсмограммы первичных сейсмических волн и вторичных – акустических. Стрелкой показано направление ветра

ной (ДН) в градусах на уровне 0,7 от максимального значения. Как следует из представленных графиков, ширина ДН в первом случае составляет 60° , во втором – 160° . Полученные графики характеризуют ярко выраженную зависимость акустического давления колебаний вибратора от ветра. Например, в первом случае соотношение максимального и минимального значений акустического давления достигает 50 раз. С учетом такого перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что даже маломощные взрывы могут становиться экологически опасными вследствие многократного увеличения потока энергии в определенном направлении.

Метеозависимые физические эффекты в экспериментах с полигонными взрывами. По аналогии с экспериментами с вибратором изучена ветровая зависимость акустического давления от другого источника, оказывающего непосредственное разрушительное воздействие на окружающую среду, – полигонных взрывов утилизируемых запасов боеприпасов. В последние годы такие взрывы проводятся регулярно на различных полигонах России, в том числе на полигоне Шилово (Новосибирская обл.). Авторы данной работы регулярно проводят регистрацию сейсмоакустических колебаний взрывов Шиловского полигона по той же методике круговой регистрации, что и от вибратора. Соответствующая схема регистрации представлена на рис. 4.

На рис. 4 показана совмещенная картина расстановки датчиков и привязанных к ним записей взрывов, а также направления ветра, температуры и влажности воздуха. На записях выделяются волны первых вступлений – сейсмические – на временах 1,63–1,97 с и вторичные акустические на временах 27,0–32,4 с. Для условий эксперимента, приведенных на рис. 4, получена зависимость акустического давления от азимута в пределах ($-180 \div +180^\circ$) с учетом силы ветра примерно 1 м/с (рис. 5). По аналогии с вибросейсмоакустическими волнами приведенный график также отражает выраженный ветрозависимый эффект направленности распространения акустического волнового поля. Полученной зависимости соответствует ширина ДН, равная 80. Результаты экспериментов по выявлению метеозависимых акустических эффектов позволяют описать их с помощью функции направленности $f(\theta)$, которая может быть оценена по нарастанию уровней амплитуд акустических волн в пределах заданного углового сектора. В этом случае правомочно говорить об эффекте фокусировки акустосейсмических колебаний по пространству. По данным измерений акустического давления на датчиках с круговой расстановкой и значения акустического давления в контрольной точке (точка 12 на рис. 4), расположенной на удалении 0,457 км от эпицентра взрывов, оценены значения ослабления давления по азимутальному направлению. Соответствующий график представлен на рис. 5 в виде сплошной линии. Значения коэффициентов ослабления представлены на оси ординат справа. Как следует из рисунка, минимальные значения коэффициента соответствуют направлению ветра и находятся в интервале $70-72$. Максимальное значение коэффициента ослабления для данных условий проведения эксперимента приблизительно равно 1300. Таким образом, на удалении от очага взрыва в 10 км акустическое давление воздушной волны падает более чем на три порядка, при этом соотношение между максимальными и минимальным коэффициентами ослабления акустического давления, определяемое вкладом ветра, приблизительно равно 20.

Проведем сопоставление уровней акустических давлений от вибратора и полигонного взрыва. Максимум акустического давления от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км составил $p=0,03$ Па (рис. 3), в то время как от взрыва на удалении 10 км максимум был зафиксирован на уровне почти 30 Па (рис. 4). Таким образом, наблюдаемая величина акустического давления на сравнимых расстояниях от вибратора на три порядка меньше, чем от взрыва. Это доказывает

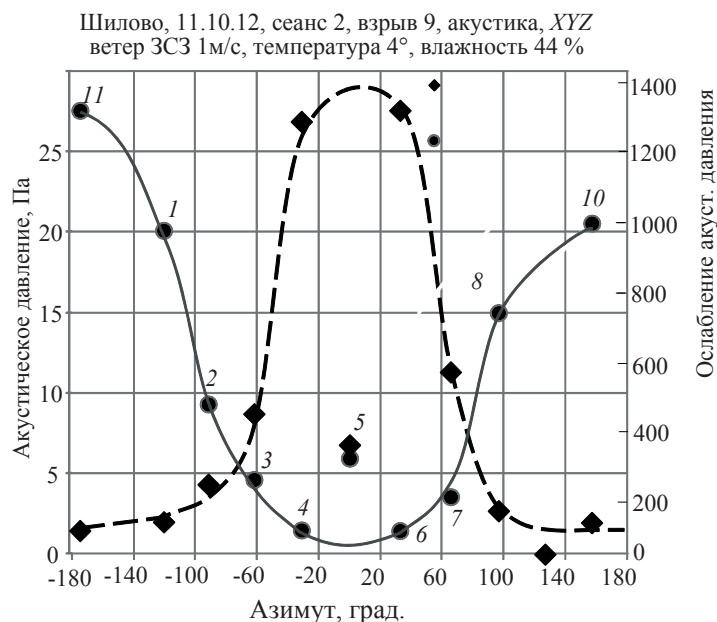


Рис. 5. График зависимости акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг в тротиловом эквиваленте при силе ветра 1 м/с и расстановке датчиков по кругу радиуса 10 км (пунктирная линия). Сплошная линия – график ослабления уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке (0,457 км от места взрыва). Значения коэффициентов ослабления приведены справа

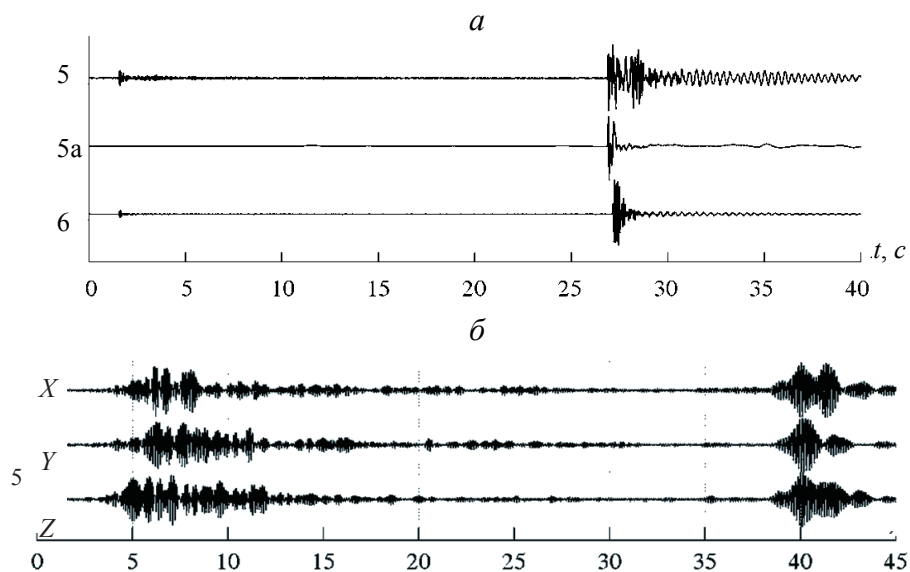


Рис. 6. Записи сейсмических и акустических волн от полигонного взрыва:
a – с сейсмодатчиков 5, 6 и акустического датчика 5а на удалении 10 км;
б – от вибратора ЦВ-40 по компонентам *XYZ* на удалении 12 км

экологическую чистоту вибратора как инструмента для проведения экспериментальных исследований.

Представляет интерес сопоставление уровней волн сейсмических (первичных) и акусто-сейсмических (вторичных) от обоих типов используемых источников. На рис. 6 представлены записи сейсмограмм по отношению к обоим источникам, полученные в точках, соответствующих максимумам сейсмоакустических волн: в точке 5 на рис. 2 (от вибратора), в точках 5, 6 на рис. 4 (от взрыва). Если в первом случае уровни обоих типов волн сопоставимы, то во втором уровень вторичной волны превосходит уровень первичной на порядок и более. Это означает, что поверхностные взрывы не могут быть использованы в качестве эффективных сейсмических источников. В то же время они порождают разрушительные инфразвуковые колебания в диапазоне частот 1–10 Гц. На рис. 7 представлены спектры таких колебаний, регистрируемые в контрольной точке на удалении 0,5 км (рис. 7а) и удаленной точке регистрации 10 км (рис. 7б). Из рассмотрения обоих спектров видно, что с удалением от источника наблюдается резкое затухание высоких частот и смещение преобладающего спектра в область инфранизких частот 1–10 Гц с максимумом вблизи 5 Гц.

2. Оценивание геоэкологического воздействия сейсмоакустических волн от взрывов на окружающую среду. Экологическое воздействие взрывов оценивается удельной плотностью энергии, вычисляемой по формуле

$$E = \frac{1}{\rho c_0} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (1)$$

Здесь ρc_0 – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см²×с); $p(t)$ – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика; T – длительность акустической волны. Значение энергии волнового импульса рассчитывается по экспериментально полученным записям.

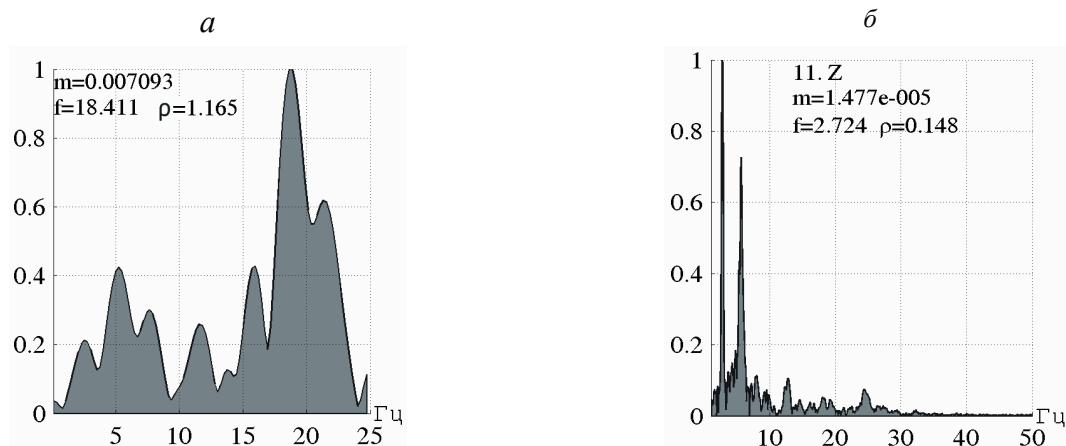


Рис. 7. Спектры акустической волны от полигонного взрыва на удалении 0,5 (а) и 10 км (б)

Таблица

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры

Охраняемый объект	Критическое значение удельной энергии $\epsilon_{кр}$, Дж/м ²	
	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

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются значениями удельной плотности энергии в единицах Дж/м², приведенными в таблице ниже. Как видно из таблицы, для человека безопасной является величина удельной плотности энергии до 3 Дж/м². По отношению к полигонным взрывам, характеризуемым мощностью в тротиловом эквиваленте около 125 кг, в соответствии с (1) были получены оценки удельной акустической энергии в точках 1-11 круговой расстановки датчиков (рис. 4), а также в контрольной точке 12. В качестве примера на рис. 8 приведен один из графиков азимутального распределения энергии в пространстве в пределах -180° \div $+180^{\circ}$ при скорости ветра 1 м/с, влажности воздуха 44 %. Особенность его состоит в ярко выраженном явлении фокусировки акустической энергии в пространстве, в данном случае в пределах азимутального угла около 50 град. Соотношения значений удельной энергии от взрывов, критическими для разных объектов, представлены в таблице, а также на рис. 9. Номера столбцов 1–4 на рис. 9 соответствуют типам объектов, 5–6 – значениям удельной энергии от взрыва на расстояниях от 0,5 до 10 км соответственно. Допустимые и измеренные значения удельной энергии проставлены сверху над каждым столбиком.

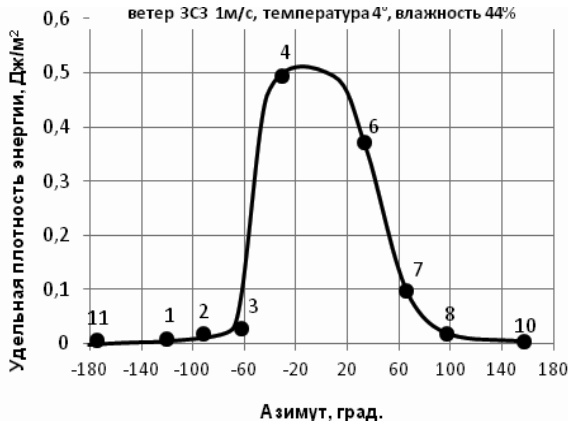


Рис. 8. График распределения энергии взрыва от азимута при скорости ветра 1 м/с, температуре 4 °С, влажности воздуха 44 %

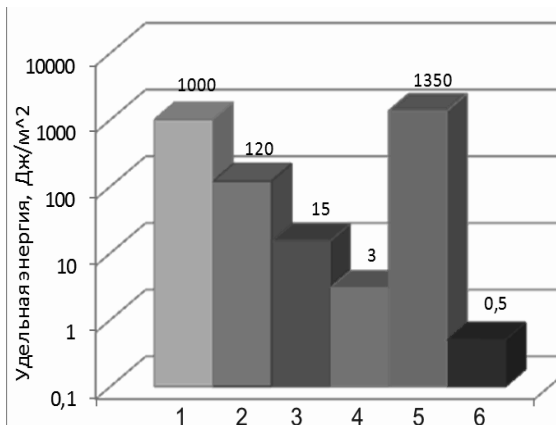


Рис. 9. Критические значения удельной энергии для строений: 1 – жилое здание при однократном взрыве; 2 – жилое здание при многократных взрывах; 3 – оконное стекло толщиной 2–3 мм; 4 – для человека. Значения удельной энергии от взрыва на удалении 0,5 (5) и 10 км (6)

Таблица и рис. 9 характеризуют уровень опасности взрывов данной мощности для различных типов объектов. В частности, видно, что взрыв с тротиловым эквивалентом в 125 кг на удалении 0,5 км является разрушительным для строений и тем более опасен для человека, поскольку превышение допустимой нормы составляет ориентировочно 400 раз.

3. Результаты численного моделирования. Проведены численные расчеты по оцениванию эффектов направленности акустического волнового поля инфранизкочастотных источников, возникающих в движущейся среде, т. е. на фоне ветра, характеризуемого направлением и скоростью. Расчеты выполнены в соответствии с методикой, изложенной в работе [17]. В качестве модели рассматривается точечный источник инфразвука, расположенный на высоте h над поверхностью Земли. При этом поверхность Земли считается плоской, а атмосфера слоисто неоднородной. Скорости звука и ветра зависят лишь от вертикальной координаты, при этом скорость ветра имеет лишь горизонтальные составляющие. На инфранизких частотах справедливо лучевое приближение распространения звука, а изменение его интенсивности подчиняется предположению о геометрической расходимости лучей. В прямоугольной системе координат ось z направлена вверх от поверхности Земли, а направление оси x на высоте h совпадает с направлением ветра. Начальное направление луча характеризуется сферическими углами θ (зенитный угол) и φ (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению x .

Эффект направленности акустического поля характеризуется *фактором фокусировки* [18], равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0,$$

где $I(z, \theta, \varphi) = \frac{Q c_0^2 \xi}{4\pi c^4 t^2 \cos \theta} [1 + 2(w_0/c_0) \sin \theta \cos \varphi - 2\eta]$; $I_0 = Q / 4\pi [x^2 + y^2 + (z - h)^2]$; Q – мощность источника. Расчетное уравнение для фактора фокусировки имеет вид:

$$f = \frac{c_0^2 \xi [x^2 + y^2 + (z - h)^2]}{c^4 t^2 \cos \theta} [1 + 2(w_0/c_0) \sin \theta \cos \varphi - 2\eta],$$

где $c_0=c(h)$ – модуль лучевой скорости; w_0 – скорость ветра по оси x ; t – время распространения звука по лучу. Выражения для вычисления ζ и η имеют вид:

$$\xi = \left[1 - \left(\frac{c}{c_0} \right)^2 \sin^2 \theta - 2\eta + 2 \left(\frac{w_0}{c_0} \right) \left(\frac{c}{c_0} \right)^2 \sin \theta \cos \varphi \right]^{1/2},$$

$$\eta = (1/c_0) \sin \theta (w_x \cos \varphi + w_y \sin \varphi).$$

На рис. 10 приведены расчетные и экспериментальные зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения: расчетные в виде сплошных линий с указанными на рисунках скоростями, экспериментальная – в виде пунктирной линии. Оба вида зависимости получены при следующих параметрах: расчетные при скоростях ветра 4 и 6 м/с, высоте источника над землей 5 м, расстоянии "источник–приемник" 12 км; экспериментальная скорость ветра 4–6 м/с, радиус круговой расстановки датчиков – 12 км. Из сравнения приведенных зависимостей следует, что экспериментально оцененный фактор фокусировки характеризуется большей чувствительностью к ветру в сравнении с теоретическим.

Возможно, это связано с неполнотой учета начальных условий в расчетах, связанных с заданием плоской границы раздела воздух–земля вместо реальной криволинейной, а также неучетом особенностей окружающего ландшафта дневной поверхности Земли.

Заключение. 1. Предложена и экспериментально реализована методика, позволяющая оценивать экологические риски от техногенных и природных взрывов, определяемые допустимыми (критическими) плотностями акустической энергии по отношению к объектам социальной инфраструктуры. Методика основана на использовании сейсмических вибраторов, отвечающих требованиям геоэкологической безопасности и являющихся одновременно источниками сейсмических и акустических колебаний. Такие источники обладают высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует высокую повторяемость результатов исследований по оцениванию влияния метеоусловий, неоднородностей дневной поверхности Земли, состояния атмосферы на распространение "пары сейсмических и акустических колебаний".

2. Проведена большая серия экспериментов с помощью сейсмического вибратора ЦВ-40 и полигонных взрывов в комплексе с компактными автономными сейсмостанциями "Байкал" по изучению особенностей распространения акустических и сейсмических волн в широком спектре частот и на различных азимутальных направлениях с учетом геолого- и метеоусловий и па-

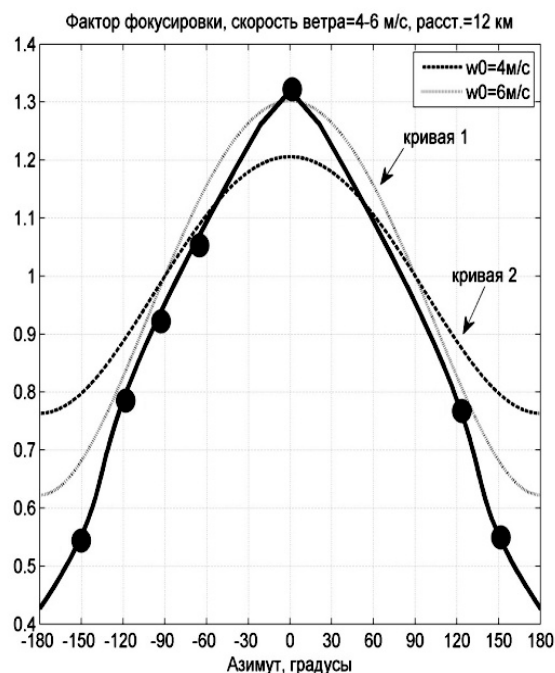


Рис. 10. Зависимость фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков 12 км и скоростей ветра 6 (кривая 1) и 4 м/с (кривая 2); высота источника – 5 м. Сплошная кривая соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки 12 км и скорости ветра 4–6 м/с

раметров обоих источников. На основе экспериментов выявлены и количественно оценены эффекты фокусировки акустических колебаний по пространству. Результаты измерений доказывают возможность многократно усиливаемого геоэкологического воздействия массовых взрывов на окружающую среду в определенных направлениях, определяемых метеофакторами. Доказано, что даже при слабом ветре 2–4 м/с соотношения максимальных и минимальных уровней акустических давлений зависимости от азимутального направления могут достигать 50 и более раз.

3. На основе сравнительного анализа уровней сейсмических и акустических волн получен вывод: основной экологически опасный эффект воздействия наземных полигонных взрывов определяется акустическими волнами, на порядок превышающими энергию сейсмических волн.

4. Получены расчетные зависимости эффекта фокусировки акустических волн в инфранизком диапазоне частот в зависимости от азимута точек наблюдения при различных значениях скорости ветра и расстояния "источник–приемник". Сопоставление расчетных и экспериментально полученных зависимостей показывает более выраженный эффект фокусировки в последнем случае в сравнении с первым.

Список литературы

1. АЛЕКСЕЕВ А. С., БЕЛОНОСОВ А. С., ПЕТРЕНКО В. Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология: сб. научн. тр. М.: ГЕОС, 2001. Вып. 32. С. 81–97.
2. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., ХАЙРЕТДИНОВ М. С. Создание технологии калибровки сейсмических станций и сейсмических трасс с использованием мощных вибраторов // Мониторинг и обнаружение подземных ядерных взрывов и землетрясений: сб. докл. междунар. семинара. М.: Изд. МНТЦ, 1998. С. 262–268.
3. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., ХАЙРЕТДИНОВ М. С. Мощные вибраторы в проблеме калибровки сейсмических станций сети // ISMS Вестник НЯЦ РК: Геофизика проблемы нераспространения. 2001. Вып. 2. С. 27–32.
4. АЛЕКСЕЕВ А. С., СЕРДЮКОВ С. В. О характеристиках горных пород, проявляющихся при длительных вибровоздействиях // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. Т. 7. С. 32–44.
5. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., ИМОМНАЗАРОВ Х. Х., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., СОБИСЕВИЧ Л. Е., ХАЙРЕТДИНОВ М. С., ЦИБУЛЬЧИК Г. М. Мониторинг геометрии и физических свойств "поверхностной" и "очаговой" дилатансных зон методом вибросейсмического просвечивания сейсмоопасных участков земной коры // Программа РАН № 16 "Изменение окружающей среды и климата". М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. 8. С. 179–223.
6. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., ХАЙРЕТДИНОВ М. С. Активные методы сейсмических исследований с мощными вибрационными источниками // Современные проблемы сейсмологии. М.: "Вузовская книга", 2000. С. 5–24.
7. Алексеев А. С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г. М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Изд-ва СО РАН, 2004.
8. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., ДРЯХЛОВ С. И. и др. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. Акад. наук. 1996. Т. 346. № 5. С. 664–667.

9. 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.

10. ХАЙРЕТДИНОВ М. С., АВРОРОВ С. А., ВОСКОБОЙНИКОВА Г. М., СЕДУХИНА Г. Ф. Результаты экспериментов по оцениванию метеозависимых сейсмоакустических эффектов от мощных взрывов и сейсмических вибраторов // Вестн. НЯЦ РК. 2012. Вып. 2. С. 62–66.

11. КРАСНОВ В. М., ДРОБЖЕВА Я. В., МАСЛОВ А. Н. Акустическое поле на земле при взрыве ракеты-носителя // Вестн. НЯЦ. 2006. Вып. 2. С. 79–85.

12. НОВЕЙШИЙ и современный вулканизм на территории России. Под ред. Н. П. Лаверова. М.: Наука, 2005.

13. ОПАРИН В. Н., САШУРИН А. Д., КУЛАКОВ Г. И., ЛЕОНТЬЕВ А. В. и др. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. С. 288.

14. ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., ХАЙРЕТДИНОВ М. С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геол. и геофиз. 1999. Т. 40. № 3. С. 431–441.

15. КОВАЛЕВСКИЙ В. В. Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами // Акуст. журн. 2005. Т. 51. С. 92–102.

16. ИСАКОВИЧ А. М. Общая акустика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.

17. РАЗИН А. В. О распространении звука в неоднородной движущейся атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океан. 1982. Т. 18. № 6. С. 674–676

18. БРЕХОВСКИХ Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.

Ковалевский Валерий Викторович – д-р техн. наук, зам. директора Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: Kovalevsky@sscc.ru;

Хайретдинов Марат Саматович – д-р техн. наук, гл. науч. сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: marat@opg.sccc.ru

Дата поступления – 18.06.2013