

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 622.271 : 351.77

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ОТ ВЗРЫВОВ ПО СОВОКУПНОСТИ СОПРЯЖЁННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ*

В. В. Губарев¹, В. В. Ковалевский², М. С. Хайретдинов^{1,2},
С. А. Авроров^{1,2}, Г. М. Воскобойникова^{1,2},
Г. Ф. Седухина², А. А. Якименко^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6
E-mail: marat@opg.sgcc.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований и численных расчётов по оцениванию метеозависимых геоэкологических рисков для окружающей социальной инфраструктуры от воздействия мощных инфразвуковых колебаний, порождаемых техногенными и природными взрывами. Результаты получены на основе применения разработанного авторами оригинального экологически безопасного подхода, предусматривающего использование сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но имеющих в сравнении с ними намного меньшую мощность. Такие источники обладают способностью возбуждать в среде одновременно сейсмические и акустические (вибросейсмоакустические) колебания с прецизионными метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует в отличие от взрывов высокую воспроизводимость результатов исследований. При этом сравнимые со взрывами результаты достигаются за счёт энергетического накопления слабых вибросейсмоакустических сигналов. Изучаются закономерности распространения инфранизкочастотных акустических волновых полей в зависимости от метеоусловий, а также учёта влияния неоднородности атмосферы. Сопоставлены результаты экспериментов и численных расчётов.

Ключевые слова: карьерные взрывы, акустосейсмические поля, геоэкологический риск, сейсмический вибратор, метеоусловия.

Введение. Проблема прогнозирования геоэкологического воздействия техногенных взрывов разного типа: короткозамедленных карьерных [1], полигонных [2], падающих ступеней ракет [3] и других — на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру является весьма актуальной. В последнее время большую опасность несут в себе массовые взрывы, связанные с уничтожением утилизируемых боеприпасов. К числу мощных природных взрывоподобных событий в первую очередь следует отнести землетрясения, извержения магматических и грязевых вулканов [4], падения небесных тел.

Известно, что основные геоэкологические эффекты от взрывов проявляются в образовании ударных воздушных и подземных сейсмических волн, формировании и распространении пылевого облака, электрических импульсов. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического эффектов массовых взрывов, которые определяют

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-01-00773, № 14-07-00518), Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 14) и Интеграционного проекта Новосибирского государственного технического университета и Сибирского отделения РАН (грант № С1-20).

целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. Подобные эффекты рассматривались в [1]. В то же время следует отметить, что слабо изучено влияние на них внешних факторов: направления и силы ветра, температурной инверсии, состояния турбулентности атмосферы, а также рельефа и ландшафта окружающей местности. Это тем более важно, поскольку их влияние может приводить к многократному усилению разрушительного экологического воздействия взрывов на окружающую среду. Поэтому возникает необходимость прогнозирования геоэкологических рисков от мощных взрывов, что требует дополнительных исследований физических эффектов распространения сейсмических и акустических волн от массовых взрывов.

Цель предлагаемой работы — изложение методологического подхода к проведению подобных исследований и полученных 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. Последнее обусловлено высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками вибрационных источников [5]. Обоснованием использования предлагаемого подхода к прогнозированию с помощью сейсмических вибраторов является их способность порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания, что уже доказано теоретически и многочисленными экспериментами [6–9].

Акустосейсмические эффекты от сейсмических вибраторов и взрывов. *Метеозависимые физические эффекты в экспериментах с сейсмическими вибраторами.* Сейсмические и акустические волны, порождаемые мощными вибраторами типа ЦВ-100, ЦВ-40, могут совместно распространяться на десятки километров от источника благодаря эффекту акустосейсмической индукции, при которой распространяющаяся в приземном волноводе акустическая волна возбуждает в земле поверхностную сейсмическую волну, регистрируемую сейсмодатчиками. Далее такую волну будем называть акустосейсмической. При этом скорости обоих типов волн совпадают и равны скорости распространения инфразвука [7]. В целях оценивания количественных эффектов влияния ветра на распространение акустических колебаний в районе вибросейсмического полигона (п. Быстровка Новосибирской обл.) была развернута сеть из автономных сейсмических станций «Байкал», расставленных по окружности радиусом либо 6, либо 12 км. В центре окружности располагается вибратор ЦВ-40 (рис. 1). Источник обладает возмущающей силой 40 тс в рабочей полосе частот 6–12 Гц.



Рис. 1. Вибрационный источник ЦВ-40

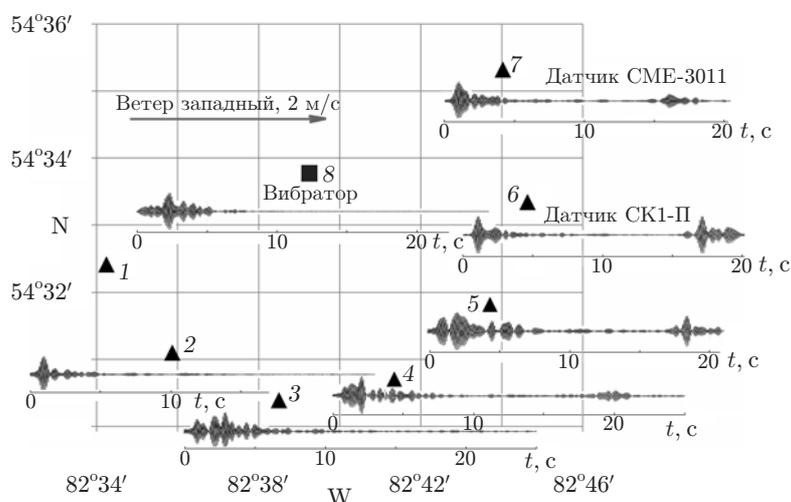


Рис. 2. Схема расстановки сейсмостанций «Байкал» с трёхкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными по окружности радиусом 6 км. Приведены вибрационные коррелограммы, иллюстрирующие вступления сейсмических и акустических волн

Одна из схем расстановки датчиков в точках окружности 1–8 представлена на рис. 2. В качестве датчиков использовались трёхкомпонентные сейсмоприёмники типа СК1-П, СМЕ-3011 (разработка Московского физико-технического института), обозначенные на рисунке треугольниками. Рисунок иллюстрирует возможности одновременной регистрации сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора с помощью датчиков. В качестве результатов регистрации и обработки приведены вибрационные коррелограммы, получаемые от корреляционной свёртки между регистрируемым и опорным сигналами. Опорный сигнал повторяет по форме зондирующий сигнал вибратора:

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

где M — число дискретных отсчётов вибрационной сейсмограммы; N — множество дискретных отсчётов регистрируемого входного сигнала $x_n = x(t_n)$; $S_n = S(t_n)$ — опорный сигнал с линейной частотной модуляцией 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 развёртки, β — скорость развёртки по частоте $\beta = (f_{\max} - f_0)/T$ (f_{\max} — максимальная частота, T — длительность развёртки).

При проведении эксперимента за основу 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 (вторые волны) на временах прихода 16–19,5 с. Под последними подразумеваются сейсмические волны, регистрируемые сейсмодатчиками как результат проявления вышеупомянутого процесса акустосейсмической индукции. Такие волны в экспериментах регистрировались сейсмическими датчиками (см. рис. 2) типа СК1-П (4–6) и СМЕ-3011 (7) по трём компонентам X, Y, Z . Как следует из рисунка, эти волны хорошо выражены на сейсмограммах при условии совпадения направлений ветра и фронта распространения акустической волны. 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

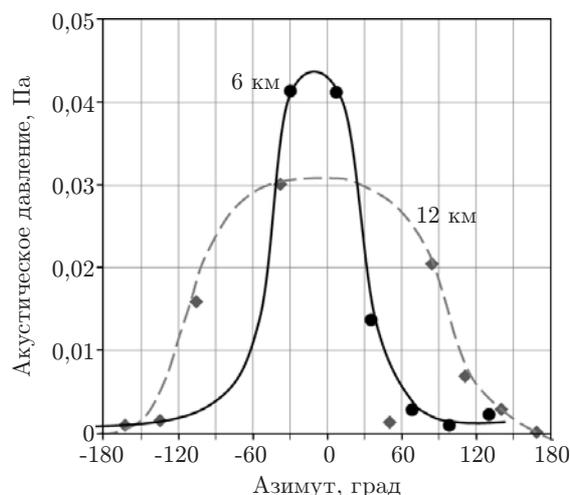


Рис. 3. Зависимости акустического давления от азимута точек наблюдения с учётом силы ветра при регистрации колебаний от вибратора ЦВ-40. Сплошная кривая — случай круговой расстановки датчиков радиусом 6 км при скорости ветра 2–4 м/с, пунктирная — 12 км и 4–6 м/с

роста эффективной скорости звука и уменьшения затухания при попутном ветре [10]. Это определяет роль метеоусловий в дальнем распространении акустических волн. Зарегистрированный эффект направленности акустического волнового поля поддаётся 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 $-180 \dots +180^\circ$ для указанных вариантов расстановки показаны на рис. 3. Здесь нулевой азимут соответствует направлению ветра. По оси ординат приведены значения акустического давления, соответствующие заданным азимутальным направлениям. Количественно эффект направленности может быть охарактеризован шириной ДН в градусах на уровне 0,7 от максимального значения. Как следует из представленных графиков ширина ДН в первом случае (сплошная кривая) составляет 60° , во втором (пунктирная кривая) — 160° . Полученные графики характеризуют резко выраженную зависимость акустического давления от ветра. Например, в первом случае соотношение максимального и минимального значений акустического давления достигает 50. С учётом такого перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что даже маломощные взрывы могут становиться экологически опасными вследствие многократного увеличения потока энергии в определённом азимутальном 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 боеприпасов. В последние годы такие взрывы проводятся регулярно на разных полигонах России, в том числе на полигоне Шилово (Новосибирская область). Регистрация сейсмоакустических колебаний взрывов на шиловском полигоне авторами данной работы проводится регулярно по вышеописанной методике круговой регистрации. Соответствующая схема представлена на рис. 4, где отражена совмещённая картина расстановки датчиков и привязанных к ним записей взрывов, а также направления ветра, температуры и влажности воздуха. На записях выделяются волны первых вступлений (сейсмические) при временах 1,63–1,97 с и вторых (акустические) при временах 27,0–32,4 с.

Для условий эксперимента, приведённых на рис. 4, получена зависимость (рис. 5)

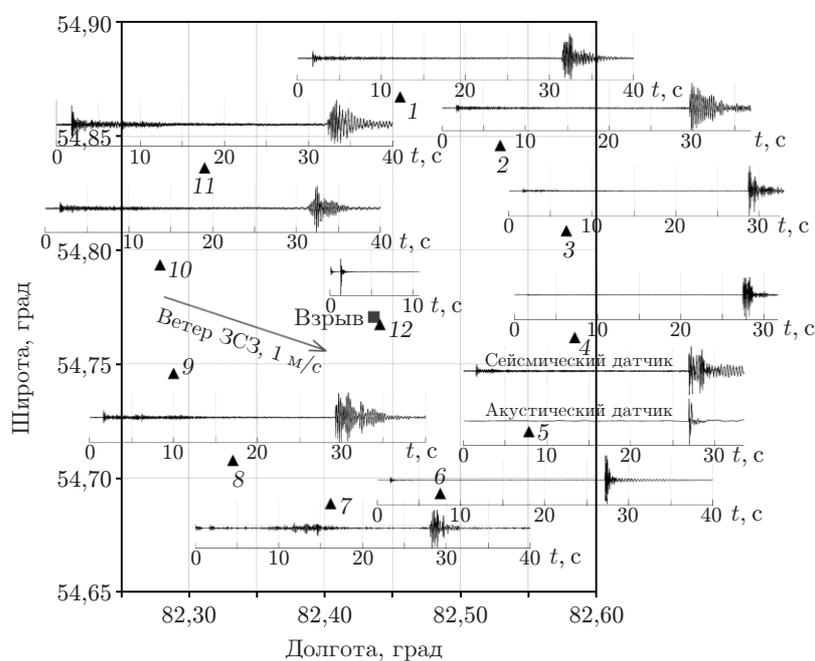


Рис. 4. Схема регистрации полигонного взрыва с тротильным эквивалентом 125 кг. Треугольниками обозначены регистраторы «Байкал» совместно с трёхкомпонентными датчиками GS-3, расположенными по окружности радиусом 10 км под номерами 1–11. Точка 12 — контрольная. Приведены сейсмограммы, иллюстрирующие первые вступления сейсмических волн и вторые вступления акустических волн

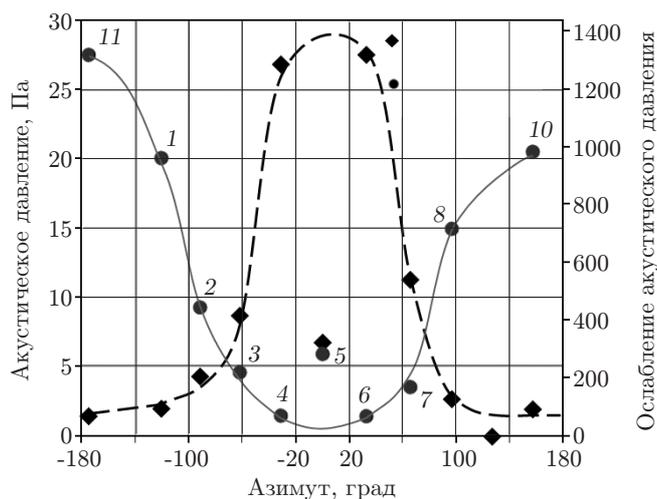


Рис. 5. Зависимость акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг при силе ветра 1 м/с и расстановке датчиков по кругу радиусом 10 км (пунктирная кривая). График ослабления уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке (0,457 км от места взрыва) — сплошная кривая. Значения коэффициентов ослабления приведены справа

акустического давления от азимута в пределах $-180 \dots +180^\circ$ с учётом силы ветра около 1 м/с. По аналогии с вибросейсмоакустическими волнами график на рис. 5 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 круговой расстановки и значениям акустического давления в контрольной точке (точка 12 на рис. 4), расположенной на удалении 0,457 км от эпицентра взрывов, оценены значения ослабления давления по расстоянию и направлению (сплошная кривая на рис. 5). Как следует из рисунка, минимальное значение коэффициента соответствует направлению ветра и лежит в пределах 70–72. Максимальное значение коэффициента ослабления для данных условий проведения эксперимента равно приблизительно 1300. Таким образом, на удалении 10 км от очага взрыва акустическое давление воздушной волны падает более чем на три порядка, при этом соотношение максимального и минимального коэффициентов ослабления акустического давления, определяемое вкладом ветра, составляет около 20.

Проведём сопоставление уровней акустических давлений от вибратора и полигонного взрыва. Максимум акустического давления от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км (см. рис. 3) составил $p = 0,03$ Па, в то время как от взрыва на удалении 10 км (см. рис. 4) был зафиксирован на уровне почти 30 Па. Таким образом, на сравнимых расстояниях от вибратора наблюдается на три порядка меньшая величина акустического давления, чем от взрыва. Это доказывает экологическую чистоту вибраторов как инструмента для проведения экспериментальных исследований.

Представляет интерес сопоставление уровней волн (первых и вторых вступлений) для обоих типов используемых источников. На рис. 6 приведены записи сейсмограмм с обоих источников, полученные в точках, соответствующих максимумам сейсмоакустических волн: в точке 5 на рис. 2 (от вибратора), в точках 5, 6 на рис. 4 (от взрыва).

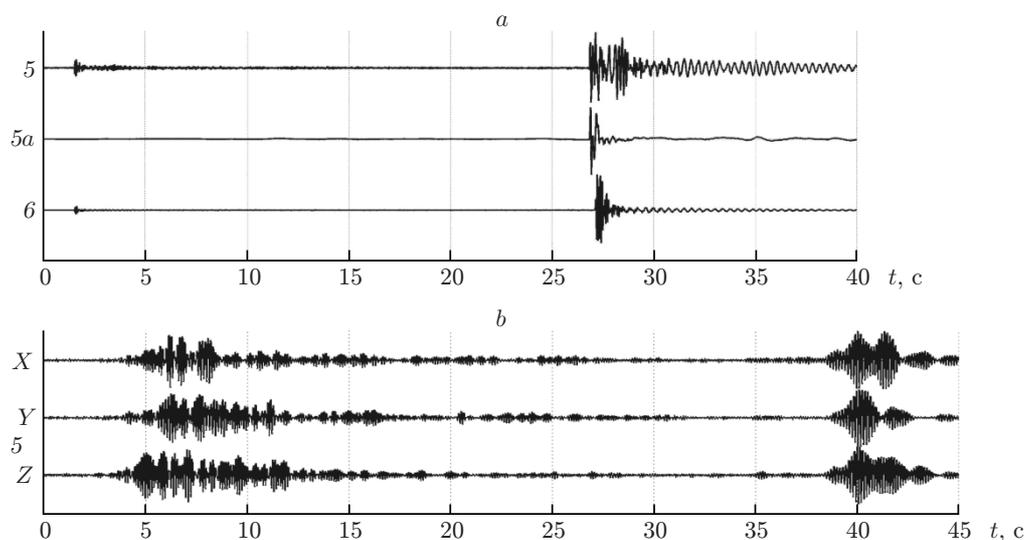


Рис. 6. Записи сейсмических и акустических волн: *a* — от полигонного взрыва на удалении 10 км с сейсмодатчиков 5, 6 и акустического датчика 5а; *b* — от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км по компонентам *X, Y, Z*

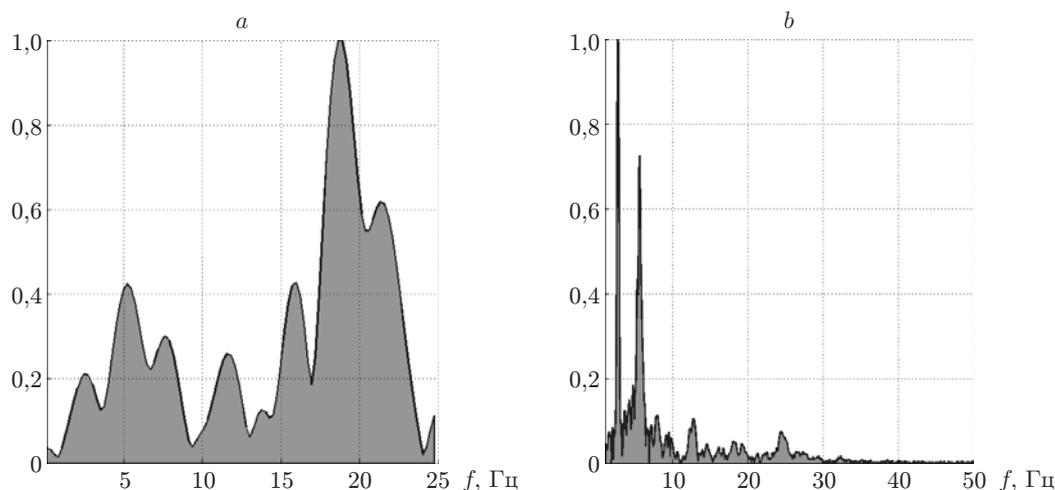


Рис. 7. Спектры акустической волны от полигонного взрыва: *a* — на удалении 0,5 км ($m = 0,007093$, $f = 18,411$), *b* — на удалении 10 км ($m = 1,477 \cdot 10^5$, $f = 2,724$) (f — значение частоты, соответствующее максимальному значению спектра m)

Если во втором случае уровни обоих типов волн сопоставимы, то в первом случае уровень второй волны превосходит уровень первой на порядок и более. Это свидетельствует о том, 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 показаны спектры таких колебаний, которые регистрировались в контрольной точке на удалении 0,5 и 10 км. Из рисунка видно, что с удалением от источника наблюдается резкое затухание высоких частот и смещение преобладающего спектра в область инфранизких частот 1–10 Гц.

Оценивание геоэкологического воздействия сейсмоакустических волн от взрывов на окружающую среду. Экологическое воздействие 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 $42 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $p(t)$ — акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика; T — длительность акустической волны. Значение энергии волнового импульса рассчитывается по экспериментально полученным записям (см. рис. 6). Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными значениями удельной плотности энергии ε , приведёнными в таблице.

Охраняемый объект	Критическое значение ε , 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

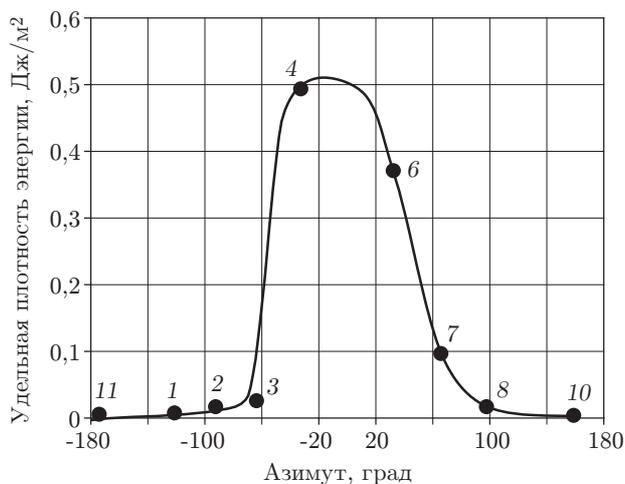


Рис. 8. График распределения энергии взрыва от азимута при ветре 1 м/с, температуре 4 °С и влажности воздуха 44 %

Как следует 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 (2) были получены оценки удельной плотности акустической энергии в точках 1–11 круговой расстановки (см. рис. 4), а также в контрольной точке 12. В качестве примера на рис. 8 приведён один из графиков азимутального распределения энергии в пространстве в пределах $-180 \dots +180^\circ$. Особенность его состоит в том, что он определяет ярко выраженное явление фокусировки акустической энергии в пространстве, в данном случае в пределах азимутального угла около 50° . Соотношения значения удельной плотности энергии от взрывов и критических значений для разных объектов представлены на рис. 9. Номера столбцов 1–4 соответствуют типам объектов, 5, 6 — значениям удельной плотности энергии от взрыва на расстояниях 0,5 и 10 км. Критические (1–4) и измеренные (5, 6) значения удельной плотности энергии обозначены сверху над каждым столбиком. Представленный рисунок характеризует уровень опасности взрывов такой мощности для разных типов объектов. В частности, видно, что взрыв с тротиловым эквивалентом в 125 кг на удалении 0,5 км является разрушительным

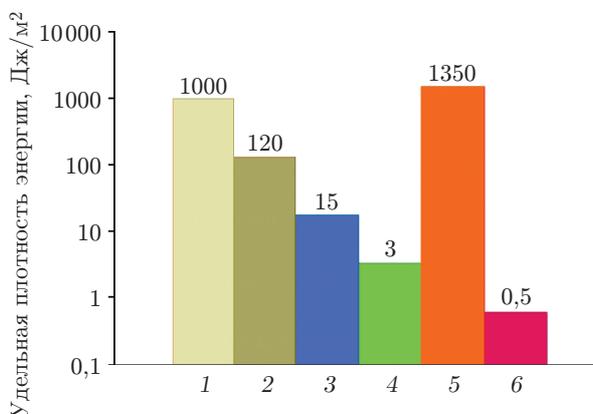


Рис. 9. Критические значения удельной плотности энергии: 1 — для жилого здания при однократном взрыве, 2 — жилого здания при многократных взрывах, 3 — оконного стекла толщиной 2–3 мм, 4 — для человека. Значения удельной плотности энергии от взрыва: 5 — на удалении от взрыва 0,5 км, 6 — на удалении 10 км

для строений и тем более опасен для человека, поскольку превышение допустимой нормы составляет ориентировочно 400 раз.

Результаты численного моделирования. Проведены численные расчёты по оцениванию эффектов направленности акустического волнового поля инфранизкочастотных источников, возникающих в движущейся среде, т. е. на фоне ветра, характеризуемого направлением и скоростью. Расчёты выполнены в соответствии с методикой [11]. В качестве модели рассматривается точечный источник инфразвука, расположенный на высоте h над поверхностью Земли, которая 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 задаётся сферическими углами θ (зенитный угол) и φ (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению x .

Эффект направленности акустического поля определяется фактором фокусировки, равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к его интенсивности в безграничной неподвижной среде: $f = I[z, \theta, \varphi]/I_0$. Здесь

$$I(z, \theta, \varphi) = \frac{Qc_0^2\xi}{4\pi c^4 t^2 \cos \theta} [1 + 2(w_0/c_0) \sin \theta \cdot \cos \varphi - 2\eta]; \quad I_0 = Q/4\pi[x^2 + y^2 + (z - h)^2];$$

Q — мощность источника.

Расчётное уравнение для фактора фокусировки запишем в виде

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

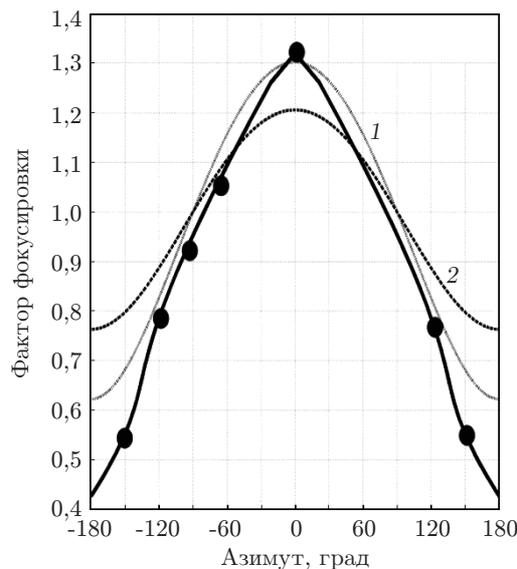


Рис. 10. Зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Расчётные графики для радиуса круговой расстановки датчиков 12 км и скоростей ветра 6 м/с (кривая 1) и 4 м/с (кривая 2). Высота источника 5 м. Сплошная кривая соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки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

где $c_0 = c(h)$ — модуль лучевой скорости; w_0 — скорость ветра по оси x ; t — время распространения звука по лучу. Выражения для ξ и η имеют вид [11]:

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

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

На рис. 10 приведены расчётные и экспериментальная зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Из сравнения приведённых зависимостей следует, что экспериментально оценённый фактор фокусировки характеризуется большей чувствительностью к ветру в сравнении с теоретическим. По-видимому, это обусловлено неполнотой учёта начальных условий в расчётах, связанных с заданием плоской границы раздела воздух — земля вместо реальной криволинейной.

Заключение. В данной работе предложена и экспериментально реализована методика оценивания экологических рисков, определяемых допустимыми (критическими) плотностями акустической энергии по отношению к объектам социальной инфраструктуры, от техногенных и природных взрывов. 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 повторяемость результатов исследований по оцениванию влияния метеоусловий, неоднородностей дневной поверхности Земли, состояния атмосферы на распространение «пары сейсмических и акустических колебаний».

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 разных азимутальных направлениях с учётом метеоусловий и параметров обоих источников. На основе экспериментов выявлены и количественно оценены эффекты фокусировки акустических колебаний по пространству, многократно усиливающие геоэкологическое воздействие массовых взрывов на окружающую среду в некотором направлении, определяемом метеофакторами. Доказано, что даже при слабом ветре 2–4 м/с соотношения максимальных и минимальных уровней акустических волн в зависимости от азимутального направления достигают 50 раз.

Из сравнительного анализа уровней сейсмических и акустических волн можно сделать вывод, что основной экологически опасный эффект воздействия наземных полигонных взрывов определяется акустическими волнами, превышающими энергию сейсмических волн на порядок.

Получены расчётные зависимости эффекта фокусировки акустических волн в инфранизком диапазоне частот от азимута точек наблюдения при разных скоростях ветра и расстояниях источник — приёмник. Сопоставление расчётных и экспериментально полученных зависимостей иллюстрирует более выраженный эффект фокусировки в последнем случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. **Хайретдинов М. С., Авроров С. А.** Обнаружение и распознавание взрывных источников // Вестн. НЯЦ РК. 2012. Вып. 2. С. 17–24.
3. **Краснов В. М., Дробжева Я. В., Маслов А. Н.** Акустическое поле на земле при взрыве ракеты-носителя // Вестн. НЯЦ РК. 2006. Вып. 2. С. 79–85.
4. **Новейший** и современный вулканизм на территории России /Под ред. Н. П. Лаверова. М.: Наука, 2005. 604 с.
5. **Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В. и др.** Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 387 с.
6. **Алексеев А. С., Глинский Б. М., Дряхлов С. И. и др.** Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // ДАН. 1996. **346**, № 5. С. 664–667.
7. **Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С.** Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. **40**, № 3. С. 431–441.
8. **Ковалевский В. В.** Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами // Акуст. журн. 2005. **51**, № 5. С. 92–102.
9. **Заславский Ю. М.** Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. 200 с.
10. **Исакович А. М.** Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
11. **Разин А. В.** О распространении звука в неоднородной движущейся атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1982. **18**, № 6. С. 674–676.

Поступила в редакцию 25 июля 2013 г.
