

Информационно-вычислительная технология прогнозирования экологических рисков по комплексу сопряженных геофизических полей *

ХАЙРЕТДИНОВ М.С., КОВАЛЕВСКИЙ В.В.

*Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, marat@opg.sccc.ru, kovalevsky@sscc.ru*

ГУБАРЕВ В.В.

*Новосибирский государственный технический университет,
gubarev@vt.cs.nstu.ru*

Доклад связан с проблемой оценки экологического воздействия комплекса сопряженных геофизических полей, порождаемых мощными техногенными и природными катастрофами, на окружающую социальную и природную среду. Интегральный эффект воздействия оценивается как результат взаимодействия сейсмических, акустических и метеорологических полей. В докладе приводятся результаты численных и экспериментальных исследований по оцениванию интегрального эффекта, количественно определяемого удельными плотностями энергии волн. Ключевые слова: сейсмический вибратор, техногенные взрывы, акустосейсмические поля, полевые эксперименты, численные расчеты, геоэкологический риск, геолого-метеорологические условия.

Введение

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

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 [1]. В тоже время следует отметить их слабую изученность от внешних факторов - метеорологических: 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

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

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 экспериментальных и численных результатов. Авторами данной работы предложен оригинальный подход к изучению указанных эффектов, который базируется на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих намного меньшей мощностью в сравнении 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 к использованию предлагаемого подхода к прогнозированию с помощью сейсмических вибраторов является способность вибраторов порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания. Такая способность данного класса источников доказана ранее теоретически и многочисленными экспериментами [6-9].

1. Акустосейсмические эффекты от сейсмических вибраторов и взрывов.

Эксперименты с сейсмическими вибраторами. Акустические волны, порождаемые мощными вибраторами (типа ЦВ-100, ЦВ-40), могут распространяться на десятки километров от источника, при этом распространяющаяся в приземном волноводе акустическая волна возбуждает в Земле поверхностную сейсмическую волну, которая регистрируется сейсмическими датчиками. В дальнейшем такую волну будем называть акустосейсмической. При этом скорости обоих типов волн совпадают и равны скорости распространения инфразвука [9]. С целью 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 с радиусом либо 6 км, либо 12 км. В центре окружности располагается вибратор ЦВ-40. Источник обладает возмущающей силой 40 тс в рабочей полосе частот 6-12 Гц. Одна из схем расстановки датчиков 1-7 в точках окружности с радиусом 6 км представлена на рис.1 (датчики обозначены треугольниками). Датчик 8 является контрольным и располагается рядом с вибратором.

На рисунке 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 [5]. 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. Как следует из рис.2 акустосейсмические волны хорошо выражены на сейсмограммах при условии совпадения направлений ветра и фронта распространения акустической волны от источника. На рис.2 направление и сила ветра показаны стрелкой и равны в данном случае 2-4 м/с. Такая особенность распространения акустических волн известна в акустике

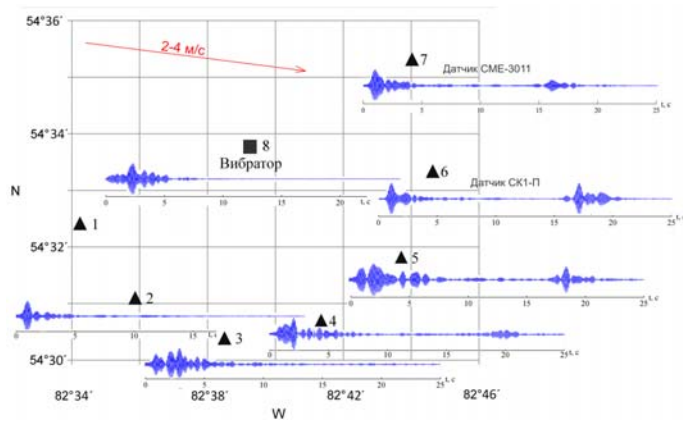


Рис. 1. Схема расстановки сейсмостанций "Байкал" с трехкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными по окружности радиусом 6 км. Приведены вибрационные кореллограммы, иллюстрирующие вступления сейсмических и акустических волн. Стрелкой показано направление ветра.

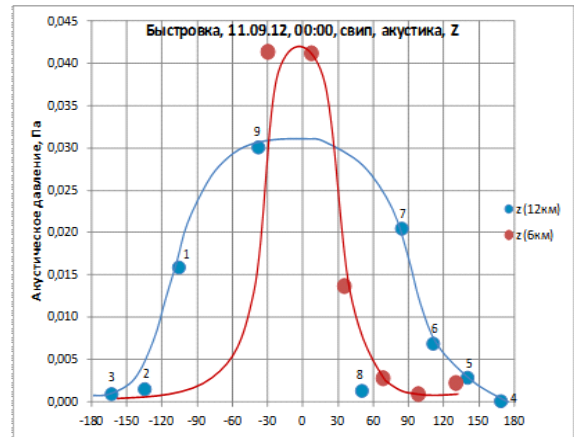


Рис. 2. Графики зависимости акустического давления от азимута в зависимости от ветра при регистрации колебаний от вибратора ЦВ-40. Красная линия-случай круговой расстановки датчиков с радиусом 6 км при скорости ветра 2-4 м/с; голубая линия-соответственно 12км и 4-6 м/с

как явление роста эффективной скорости звука и уменьшения затухания при попутном ветре [10]. Это определяет роль метеоусловий в дальнейшем распространении акустических волн. Зарегистрированный эффект направленности акустического волнового поля может быть охарактеризован диаграммой направленности (ДН), количественные характеристики которой были оценены в экспериментах с круговой расстановкой сейсмодатчиков по отношению к источнику для двух радиусов – 6 и 12 км. Соответствующие ДН волнового поля в пределах азимутов $-180 \div +180$ град. представлены на рис.3. Здесь нулевой азимут соответствует направлению ветра. По оси ординат представлены значения акустического давления в Па, соответствующие 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 составляет 60 град., во втором – 160 град. Полученные графики характеризуют резко выраженную зависимость акустического давления от ветра. Например, в первом случае соотношение максимального и минимального значения акустического давления достигает 50. 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.

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 разных полигонах России, в том числе на полигоне Шилово (Новосибирская область). Регистрация сейсмоакустических колебаний взрывов Шиловского полигона авторами данной работы проводится регулярно по той же методике круговой регистрации, что и от вибратора. Соответствующая схема регистрации представлена на рис.4. На рисунке отражена 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 акустические – на временах 27.0-32.4 с.

Для данных условий эксперимента, приведенных на рис.3, получена зависимость (рис.4) акустического давления от азимута в пределах ($-180 \div +180$ град.) с учетом силы ветра около 1 м/с. По аналогии с вибросейсмоакустическими волнами приведенный график также отражает остро выраженный ветрозависимый эффект направленности распространения акустического волнового поля.

Полученной зависимости соответствует ширина ДН, равная 80 град. 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.

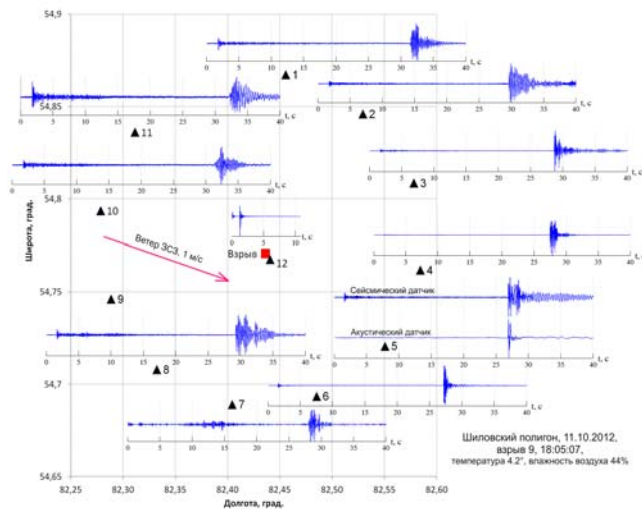


Рис. 3. Схема регистрации полигонного взрыва с тротильным эквивалентом 125 кг. Треугольниками обозначены регистраторы "Байкал" совместно с трехкомпонентными датчиками GS-3, расположенными по окружности радиусом 10 км под номерами 1-11. Точка 12-контрольная точка. Приведены сейсмограммы, иллюстрирующие первые вступления сейсмических волн, и вторые-акустических волн. Стрелкой показано направление ветра.

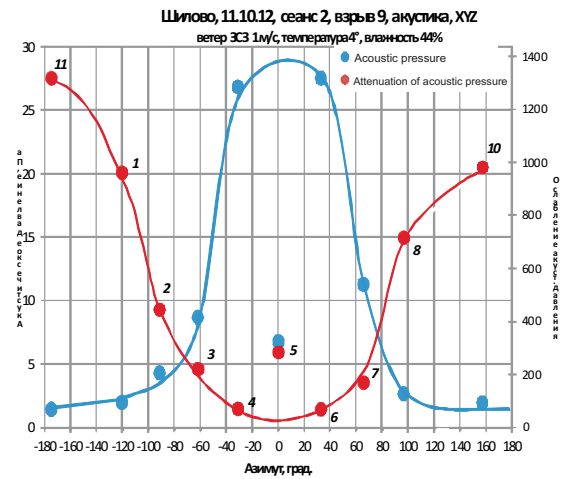


Рис. 4. График голубого цвета-зависимость акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг, при силе ветра 1 м/с. и расстановки датчиков по кругу с радиусом 10 км. График красного цвета-ослабление уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке (0,457 км от места взрыва). Значения коэффициентов ослабления приведены справа.

По данным измерений акустического давления на датчиках круговой расстановки 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 расстоянию и направлению. Соответствующий график (красного цвета) представлен на рис.5. Значения коэффициентов ослабления представлены на оси ординат справа. Как следует из рисунка минимальные значения коэффициента соответствуют направлению ветра и лежит в пределах 70-72. Максимальное значение коэффициента ослабления для

данных условий проведения эксперимента – составляет около 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, составляет около 20.

Проведем сопоставление уровней акустических давлений от вибратора и полигонного взрыва. Максимум акустического давления от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км (рис.3) составил $p=0.03$ Па, в то время как от взрыва на удалении 10 км (рис.4) максимум был зафиксирован на уровне почти 30Па. Таким образом, на сравнимых расстояниях от вибратора наблюдается на три порядка меньшая величина акустического давления, чем от взрыва. Это доказывает экологическую чистоту вибраторов как инструментов для проведения экспериментальных исследований. Для обоих типов используемых источников

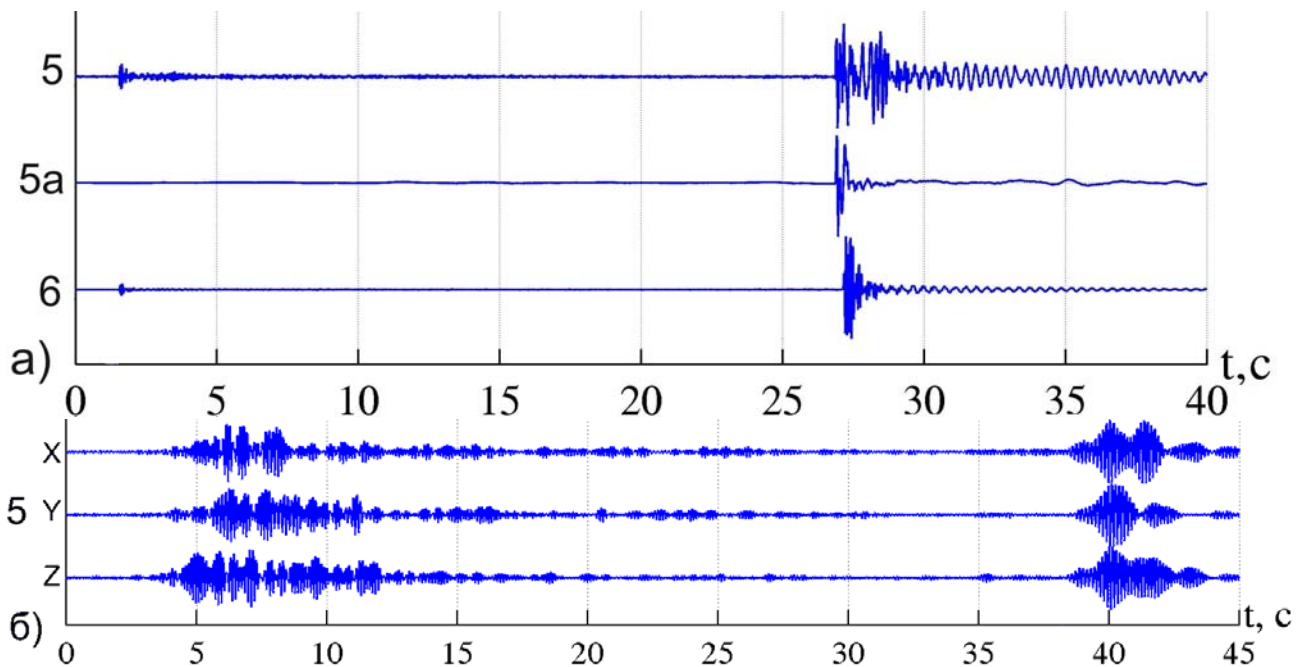


Рис. 5. а)- записи сейсмических и акустических волн от полигонного взрыва, полученные на удалении 9,1 км с сейсмодатчиков 5, 6 и акустического датчика 5а; б) -от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км по компонентам XYZ

представляет интерес сопоставление уровней их волн: первых вступлений (сейсмических) и вторичных – акустосейсмических. По отношению к обоим источникам на рис.5 представлены записи сейсмограмм, полученные в точках, соответствующих максимумам акустосейсмических волн: от взрыва – рис.5а и от вибратора – рис.5б. Если во втором случае уровни обоих типов волн сопоставимы, то в первом случае уровень акустической волны превосходит уровень первичной (сейсмической) на порядок и более. Это говорит о том, что поверхностные взрывы не могут быть использованы в качестве эффективных сейсмических источников. В то же время они порождают разрушительные инфразвуковые колебания в воздухе в диапазоне частот 1-10 Гц.

2. Оценивание геоэкологических рисков от взрывов на окружающую среду.

Экологическое воздействие взрывов оценивается удельной плотностью энергии:

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

Здесь ρc – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное $42 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $p(t)$ – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика; T – длительность акустической волны. Значение энергии волнового импульса рассчитывается по экспериментально полученным записям. Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются критическими значениями удельной плотности энергии в единицах $\text{Дж}/\text{м}^2$. 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 (рис.3), а также в контрольной точке 12. В качестве примера на рис. 6 приводится один из графиков азимутального распределения энергии в пространстве в пределах $(-180 \div +180 \text{ град.})$, соответствующий скорости ветра $1 \text{ м}/\text{с}$, влажности воздуха 44% . Особенность его состоит в том, что он характеризует ярко выраженное явление фокусировки акустической энергии в пространстве, в данном случае в пределах азимутального угла около 50 град. Экспериментально полученные оценки энергий волн сопоставлены с критическими (разрушительными) значениями. Такое сопоставление для разных типов объектов представлены на рис. 7. Номера столбцов 1-4 соответствуют типам объектов и относящихся к ним критических значений, номера 5,6 – значениям удельной энергии от взрыва на расстояниях от 0.5 и 10 км соответственно. Допустимые и измеренные значения удельной энергии проставлены сверху над каждым столбиком. Представленный рисунок характеризует уровень опасности взрывов данной мощности для разные типов объектов. Видно, что на удалении 0.5 км взрыв с тротиловым эквивалентом в 125 кг является разрушительным для строений, оконных стекол и опасен для человека, поскольку в последнем случае превышение допустимой нормы составляет ориентировочно 400 раз. В тоже время на удалении 10 км его энергия является безопасной для рассмотренных типов объектов.

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 [11]. В качестве модели рассматривается точечный источник инфразвука, расположенный на высоте h над поверхностью Земли. При этом поверхность Земли считается плоской, а атмосфера слоисто неоднородной. Скорость 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 интенсивность его 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

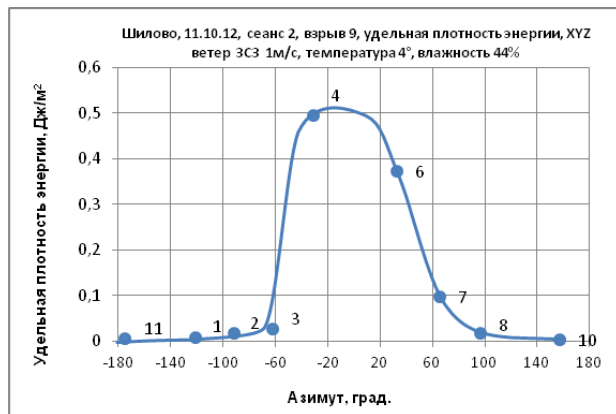


Рис. 6. График распределения энергии взрыва от азимута при ветре 1м/с, температуре и влажности воздуха 4град. и 44% соответственно.

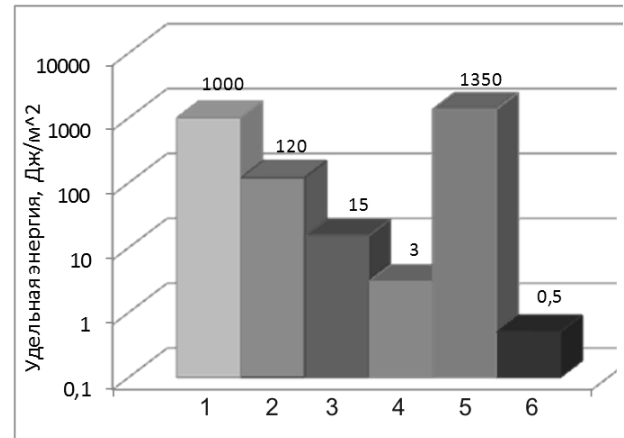


Рис. 7. Критические значения удельной энергии для строений: 1- жилое здание при однократном взрыве; 2- жилое здание при многократных взрывах; 3 - оконное стекло толщиной 2-3 мм; 4 - для человека. Значения удельной энергии от взрыва: 5 - на удалении от взрыва 0.5 км; 6 - на удалении 10 км.

луча характеризуется сферическими углами (зенитный угол) и (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению x. Эффект направленности акустического поля характеризуется фактором фокусировки, равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде: $f = I[z, \theta, \varphi]/I_0$. Здесь

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

$I_0 = Q/4\pi [x^2 + y^2 + (z - h)^2]$; 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 ξ и η имеют вид:

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

На рис.8 приведены расчетные и экспериментальные зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения: расчетные в виде сплошных цветных линии 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 на 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 в районе больших азимутов точек наблюдения. Повидимому, такое отклонение определяется некоторой идеализацией выбора начальных условий при расчетах..

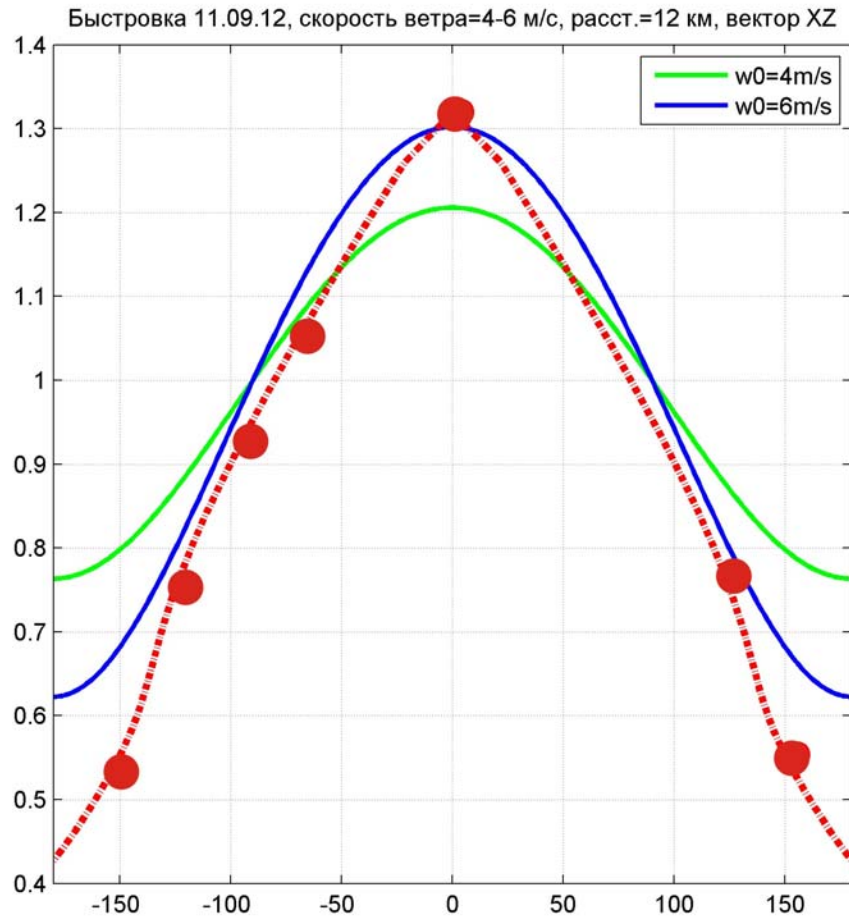


Рис. 8. Зависимость фактора фокусировки от азимута точки наблюдения: расчетные-сплошные цветные линии с указанными скоростями;; экспериментальные-пунктирные линии: а) -для радиуса круговой расстановки датчиков 6 км и скорости ветра 2-4 м/с; б)- радиуса 12 км и скорости ветра 4-6 м/с. Высота источника- 5 м

Заключение

- Предложена и экспериментально реализована методика оценивания экологических рисков от техногенных и природных взрывов, определяемых допустимыми (критическими) значениями плотности 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 экспериментов;

- Проведена большая серия экспериментов с помощью сейсмического вибратора ЦВ-40 и полигонных взрывов в комплексе с сейсмостанциями "Байкал" по изучению особенностей распространения акустических и сейсмических волн в широком спектре частот и на разных азимутальных направлениях с учетом геолого- и 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 определенном направлении, определяемом метеофакторами. В частности, доказано, что даже при слабом ветре 2-4 м/с соотношения максимальных и минимальных уровней акустических волн в зависимости от азимутального направления достигают до 50 раз, что может явиться причиной высокой экологической опасности техногенных взрывов. Очевидно, что с увеличением мощности взрывов разрушительное воздействие, обусловленное эффектом фокусировки инфразвука, будет многократно усиливаться;
- На основе сравнительного анализа уровней сейсмических и акустических волн вытекает вывод, что основной экологически опасный эффект воздействия наземных полигонных взрывов определяется акустическими волнами, превышающими энергию сейсмических волн на порядок;
- Получены расчетные зависимости эффекта фокусировки акустических волн в инфранизком диапазоне частот в зависимости от азимута точек наблюдения при разных значениях скорости ветра и расстояний "источник-приемник". Проведено сопоставление расчетных и экспериментально полученных зависимостей, полученных при одних и тех же исходных параметрах. Отмечается более сильное влияние метеоусловий на фактор фокусировки акустических волн в экспериментах по сравнению с теоретическими результатами, что требует дополнительного анализа начальных условий распространения акустических волн.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00387-а, 11-07-10000-к, 12-01-00773

Список литературы

- [1] V.V.Adushkin, A.A. Spivak, S.P. Soloviev Geoeological consequences mass chemical explosions in career // Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocrylogy.-2000.- No.6, P.555-563.
- [2] Хайретдинов М.С, Авроров С.А. Обнаружение и распознавание взрывных источников// Вестник НЯЦ РК, вып.2, июнь 2012 с. 17-24
- [3] Краснов В.М., Дробжева Я.В., Маслов А.Н. Акустическое поле на земле при взрыве ракеты-носителя. Вестник НЯЦ, вып.2, 2006, с.79-85.
- [4] Новейший и современный вулканизм на территории России. Под ред. Лаверова Н.П. М.: "Наука", 2005, 604 с.

- [5] Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В.Ковалевский, М.С.Хайретдинов и др. / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: Филиал "Гео"Издательства СО РАН, 2004. 387с.
- [6] 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// Доклады РАН, т.346, No 5, 1996, 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. Т.40, No 3. - С.431-441.
- [8] Заславский Ю.М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2007, 200с.
- [9] Ковалевский В.В. Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами//Акуст. журн., 2005, т.51, с.92-102.
- [10] Исакович А.М. Общая акустика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973, 496с.
- [11] Разин А.В. О распространении звука в неоднородной движущейся атмосфере// Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982, т.18, No 6, с674-676.