



УДК 550.34.034+534-6+282.256.341+470.55

Сравнительный анализ сейсмических и инфразвуковых сигналов при импульсных событиях и землетрясениях

А. Г. Сорокин

Институт солнечно-земной физики СО РАН

А. А. Добрынина

Институт земной коры СО РАН

Аннотация. Используются данные регистрации акустических и сейсмических сигналов от импульсных источников и землетрясений. Полагается, в случае импульсного источника в атмосфере акустический удар возбуждает сильную поверхностную сейсмическую волну, параметры которой связаны с характеристикой верхнего слоя разреза земной коры. При землетрясении акустический сигнал в атмосфере возбуждается сейсмической волной, также проходящей через верхний слой разреза земной коры.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) верхнего слоя разреза земной среды для проходящей акустической волны как в случае Челябинского метеороида, так и для сейсмической волны от Хубсугульского землетрясения (Монголия) 5 декабря 2014 г. описывается с помощью метода спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмического шума, предложенного Накамуры в 1989 г. АЧХ среды является непосредственной характеристикой, указывающей на характеристические частоты, на которых возможен сейсмический или акустический отклик на импульсный сигнал. Для анализа и сравнения сигналов отклика используются данные наблюдений одновременных инфразвуковых и сейсмических эффектов при падении Челябинского метеороида в 2013 г. и Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г. с энергетическим классом 13,9.

Дается вывод о том, что в случае акустического удара от взрыва Челябинского метеороида частоты сейсмического сигнала хорошо согласуются с локальными характеристическими частотами спектрального отношения компонент микросейсмического шума, определенными независимо. Однако в случае землетрясения 5 декабря 2014 г. характеристические частоты микросейсмического шума не согласуются с частотами спектра акустического сигнала. Причина, вероятно, состоит в том, что в случае землетрясения имеет место значительно больший масштаб источника и, соответственно, иной механизм генерации акустического сигнала.

Ключевые слова: атмосфера, акустический импеданс, землетрясение, инфразвук, метеороид, промышленный взрыв, сейсмическая волна, ядерный взрыв.

Введение

Акустические сигналы от землетрясений наблюдаются довольно редко и поэтому не были столь хорошо известны вплоть до сильного Аляскинского землетрясения 1964 г. (магнитуда $M = 9$). Землетрясение сгенерировало

атмосферные волны давления с необычно длинным периодом (~14 мин), которые были четко зарегистрированы в Беркли и на нескольких калифорнийских инфразвуковых станциях. Научный интерес к акустическим сигналам от землетрясений обусловлен по крайней мере двумя факторами. Первый из них состоит в том, что землетрясения действительно возбуждают интенсивные акустико-гравитационные волны, о чем свидетельствуют экспериментальные данные, указанные выше. Второй фактор говорит о том, что акустико-гравитационные волны мощных наземных источников являются основным транспортом для переноса энергии снизу до ионосферных высот. Кроме того, при выходе сейсмических волн на границу с атмосферой образуются поверхностные сейсмические волны, распространяющиеся с достаточно большой скоростью (выше скорости звука в атмосфере), и поэтому их ударный фронт может быть источником быстро распространяющихся инфразвуковых волн. При этом структура акустико-гравитационных волн, возбуждаемых землетрясением, достаточно сложна. Так, на примере землетрясения на Аляске 1964 г. было показано, что акустические сигналы, обусловленные землетрясением, состоят из нескольких волновых групп и их амплитуда хорошо согласуется с сейсмическими вертикальными движениями поверхности земли вблизи акустического датчика, а соответствующие скорости этих волн достаточно высоки (4–6 км/с). Волновые группы акустических сигналов последовательно возбуждаются сейсмическими *P*- и *S*-волнами, а также интенсивными поверхностными волнами Рэлея. Некоторые теоретические модели возбуждения акустико-гравитационных волн мощными подземными источниками были созданы много позднее [10].

Эруптивные источники сейсмической энергии (взрывы и землетрясения) возбуждают не только сейсмические волны различных типов, но и производят заметные акустические эффекты. В реальности процесс возбуждения звука достаточно сложен для строгого описания, поэтому к настоящему времени разработана только математическая модель подземного ядерного взрыва для профиля скорости частиц в инфразвуковой волне на некоторой сферической поверхности над уровнем Земли, характеризующей энергию акустического излучения с учетом акустического импеданса двух сред [1; 10].

В настоящей работе проводится совместный анализ акустических эффектов и сейсмических волн при землетрясениях и взрывах. Несмотря на существенное различие в механизмах возбуждения сейсмических волн от взрывов и землетрясений, эти два типа событий имеют общие характеристики: например, существует прямая зависимость между энергией землетрясения и взрывов и геометрическими размерами их очагов [4; 5], что позволяет оценить энергетические свойства землетрясения, а также роль акустической жесткости пути распространения сейсмической волны или акустического импеданса среды.

Обзор возможных источников сейсмических и инфразвуковых сигналов

Известно, что глубокие подземные взрывы, равно как и землетрясения, труднообнаружимы акустическим методом на больших горизонтальных расстояниях из-за ухода большей доли акустической энергии в зенит. Тем не менее на станции Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН, расположенной в урочище Бадары в Бурятии, к настоящему времени получено достаточно большое количество данных по ядерным взрывам в районе оз. Лобнор (Китай) (рис. 1, *А*), подземным ядерным взрывам в Казахстане (рис. 1, *Б*), крупным промышленным взрывам по программе «Масса» (рис. 1, *В*) и др. В настоящее время ядерные взрывы запрещены Международным договором о Всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) и проводятся достаточно редко отдельными государствами, не принявшими международное соглашение. Рассмотрим несколько примеров ядерных испытаний, проведенных в эпоху, предшествующую ДВЗЯИ. Китайский ядерный воздушный взрыв был произведен 23 января 1976 г. в горном районе Китая в районе оз. Лобнор. Его высота составляла около 14 км, продолжительность инфразвукового сигнала ~40 мин (см. рис. 1, *А*). Максимальный наблюдаемый период сигнала ~10 с, максимальная амплитуда достигала ~20 микробар. Официально сообщенная мощность взрыва составляла 17–20 кт в эквиваленте тринитротолуола (ТНТ) ($1 \text{ кт} = 4,184 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$). На рисунке 1, *Б* приведены записи инфразвуковых сигналов от двух подземных ядерных взрывов в районе ядерного полигона «Семипалатинск» (Казахстан) на удалении около 1700 км от места регистрации (Бурятия, Тункинский район). В первом случае (3 апреля 1988 г.) мощность взрыва составляла 150 кт ТНТ, а во втором (22 апреля 1988 г.) – 20 кт ТНТ. Размах амплитуд полученных сигналов составлял 5,0 и 0,5 микробар, в то время как периоды зарегистрированных инфразвуковых сигналов для этих двух случаев равны и составляют 6 с. Возможно, это связано с тем, что существующий атмосферный волновод, работающий на трансляцию инфразвуковых сигналов на большие расстояния от источников с различной мощностью, выделяет только определенную отдельную спектральную моду инфразвукового сигнала.

В апреле 1982 г. был организован эксперимент по регистрации инфразвукового излучения от мощного промышленного взрыва на карьере «Перевал» в районе г. Слюдянки (Иркутская область). Общая масса взрывчатых веществ составляла около 350 т. По измерениям базовой трехпозиционной инфразвуковой станции Бадары на расстоянии 100 км от эпицентра был записан инфразвуковой сигнал с размахом амплитуды около 35 микробар (см. рис. 1, *В, Г*). Форма сигнала соответствовала уже сформировавшейся инфразвуковой волне с периодом около 1,7 с, длительностью около 65 с и скоростью следа волны 370 м/с. Азимут сигнала (103°) практически совпадал с направлением на источник. Траекторные расчеты инфразвуковых лучей при известном метеорологическом высотном профиле температуры и известных времени и дальности распространения показывают, что точка поворота акустических лучей находится на уровне стратопазузы на высоте около 25 км, поскольку там наблюдается значительное увеличение эффективной скорости звука (скорость звука плюс скорость ветра).

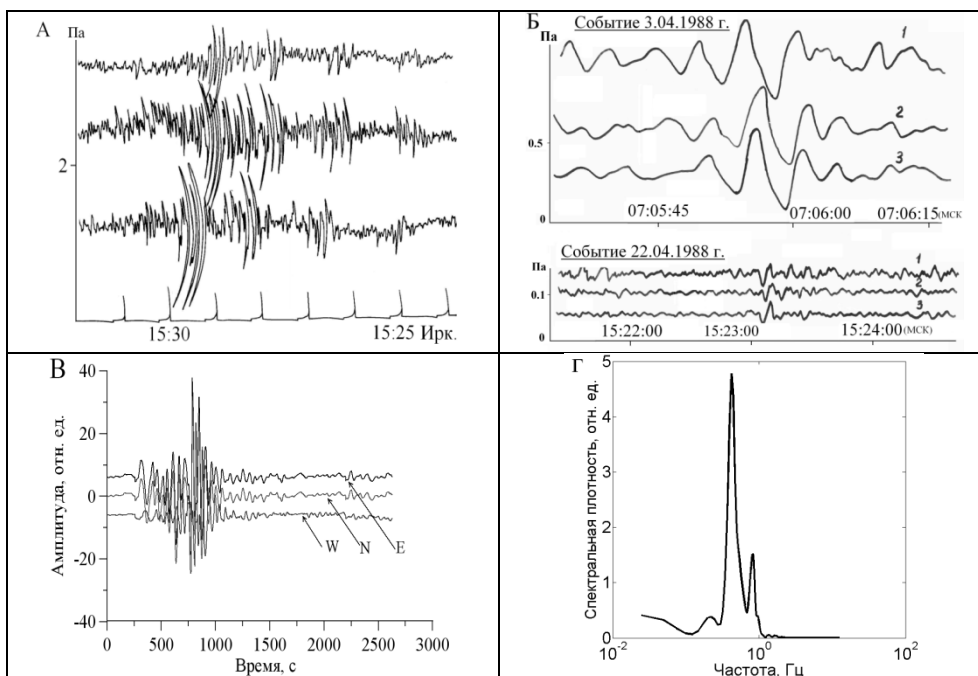


Рис. 1. Инфразвуковые сигналы, зарегистрированные на станции Бадары:

А – ядерный взрыв в атмосфере 23 января 1976 г. (Китай, оз. Лобнор), по оси абсцисс справа налево отсчитывается время, по оси ординат – амплитуда сигнала в Па; Б – подземные ядерные взрывы на полигоне «Семипалатинск» (Казахстан) 3 апреля (вверху – мощность 150 кт) и 22 апреля (внизу – мощность 20 кт) 1988 г., по оси абсцисс слева направо отсчитывается время, по оси ординат – амплитуда сигнала в Па; В, Г – микробарограмма (В) и спектр (Г) инфразвукового сигнала промышленного взрыва на карьере «Перевал», г. Слюдянка (Иркутская область, Россия), 25 апреля 1982 г.

Сейсмические и акустические эффекты Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г. (Монголия)

Хубсугульское землетрясение произошло 5 декабря 2014 г. в северо-восточной части акватории оз. Хубсугул (Монголия). По данным Байкальского филиала Федерального исследовательского центра единой геофизической службы РАН, время в очаге 18:04:19.7 UT, координаты 51,37° с. ш. и 100,63° в. д., энергетический класс $K = 13,9$. Через 21 мин после основного землетрясения последовал второй толчок меньшей энергии – $K = 11,9$. Землетрясения локализованы в Хубсугульской впадине, глубина оз. Хубсугул в эпицентральной области достигает 100–150 м. Особенностью этих землетрясений является наличие инфразвукового сигнала, зарегистрированного инфразвуковой станцией Торы (ИСЗФ СО РАН), расположенной в Торской впадине на расстоянии 160–175 км от эпицентра Хубсугульского землетрясения и его афтершока. Погодные условия в момент прохождения инфразвукового сигнала следует оценить как очень хорошие: по данным метеостанции в пос. Торы, скорость ветра не превышала 1 м/с, на метеостанции в

пос. Монды (расстояние 41 км от эпицентра Хубсугульского землетрясения) – 1–2 м/с, согласно данным сайта «Погода в мире».

На рисунке 2, *А* представлен фрагмент сейсмограммы землетрясения (сейсмическая станция Монды, эпицентральное расстояние 41 км), на записи четко прослеживаются основные сейсмические волны: продольная (*P*), поперечная (*S*) и более медленная поверхностная волна. Запись инфразвукового сигнала по форме очень напоминает сейсмический сигнал (рис. 2, *Б*). Время прихода сигнала на инфразвуковую станцию – 18 ч 09 мин, время распространения – 280 с. Кажущаяся скорость распространения инфразвукового сигнала ~560 м/с. Это большая скорость для звуковых волн в обычных условиях. Возможным объяснением этому факту может быть следующее: ударная волна, образованная при землетрясении, на расстоянии 160 км еще не потеряла полностью своей скорости и продолжала еще 280 с распространяться со скоростью ударного фронта. Особенностью инфразвукового сигнала является не столько модуляция его низкочастотным атмосферным процессом, как внешнее подобие сейсмическому сигналу, на котором явно выделяются признаки проявления продольной волны и далее сильной поперечной (см. рис. 2, *А–Б*).

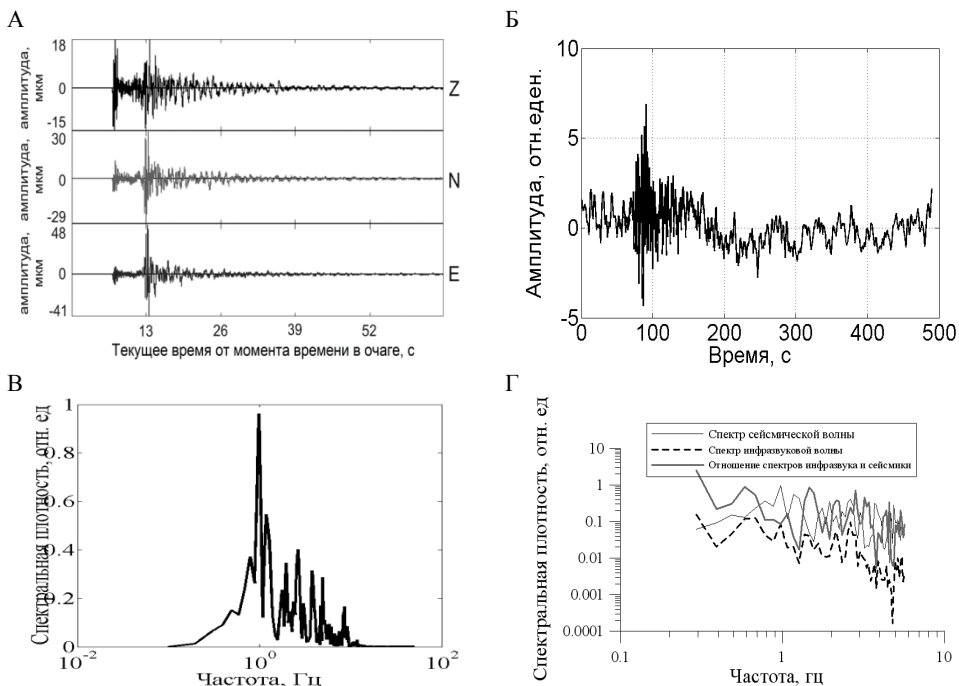


Рис. 2. Хубсугульское землетрясение 5 декабря 2014 г.:

А – сейсмограмма, полученная на сейсмической станции Монды (эпицентральное расстояние 41 км); *Б* – барограмма, полученная на инфразвуковой станции «Торы» (расстояние 160 км); *В* – спектр сейсмического сигнала; *Г* – спектры инфразвукового и сейсмического сигналов, а также их отношение

Спектральный состав сейсмических и инфразвуковых волн показан на рис. 2, *В*, *Г*. Колебания в спектре инфразвукового сигнала соответствуют низкочастотному диапазону волн с периодом 7–18 с и ниже и, скорее всего, обусловлены присутствием в атмосфере низкочастотных атмосферных колебаний естественного происхождения (см. рис. 2, *Г*). Для более коротких периодов характерен пик на частотах 0,3–0,5 Гц (периоды 2–3 с). Этот пик соответствует частотам инфразвукового сигнала и действительно связан с землетрясением.

Анализ сейсмоакустических сигналов при падении Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. (Россия)

Помимо взрывов и землетрясений, источником возбуждения инфразвуковых сигналов может также являться движение космических тел (метеоритов) в атмосфере Земли. Вторгаясь в атмосферу на огромной скорости, метеорит возбуждает сильную ударную волну, создающую впереди тела давление в несколько тысяч атмосфер. Падения метеоритов являются редкими событиями, однако в литературе описан значительный опыт наблюдений инфразвуковых эффектов подобных явлений [2; 6; 9]. Примером такого источника инфразвукового излучения могут служить пролет и разрушение Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г., сопровождавшиеся мощным излучением в инфразвуковом диапазоне частот. Инфразвуковой сигнал от Челябинского метеорита наблюдался на инфразвуковой станции «Горы» в 05:51 UT. На рис. 3, *А* показан многоцуговый инфразвуковой сигнал от взрыва Челябинского метеорита [6].

Волна давления, возникшая от взрыва метеорита, образовалась в 03:20 UT, по сообщению NASA. При расстоянии от Челябинска до Иркутска, равном 2780 км, характерное время распространения инфразвукового сигнала составило 2 ч 31 мин. Это соответствует распространению наблюдаемого инфразвукового сигнала со звуковой скоростью ($V \sim 307$ м/с).

Многоцуговую структуру инфразвукового сигнала можно объяснить как характером фрагментации метеорита при пролете и сгорании в атмосфере, так и многолучевым распространением инфразвукового сигнала в атмосфере. На рисунке 3, *Б* показан спектр мощности инфразвукового сигнала Челябинского метеорита. Гармоника с периодом около 80 с относится, вероятно, к метеорогическим процессам в пункте наблюдения, а когерентная гармоника с периодом около 30–40 с связана с энергией взрыва метеорита, которая составляет около 436 кт [6], что соответствует оценкам, выполненным по аналогичной методике в работе [7] в рамках Международной системы мониторинга ядерных взрывов (IMS).

Акустическая ударная волна, образовавшаяся при пролете и разрушении Челябинского метеороида, в результате взаимодействия с поверхностью Земли сгенерировала сильную поверхностную волну Рэлея. Эта волна отчетливо наблюдалась на 32 широкополосных сейсмических станциях, расположенных на расстоянии от 252 до 3654 км [3], на удаленных станциях она перекрывается с сейсмическими волнами от землетрясения близ о. Тон-

га (время в очаге 03:02:23,3 UT, магнитуда $M = 5,8$, координаты $-19,72^\circ$ ю. ш., $-174,48^\circ$ з. д., глубина очага равна 71,6 км, по данным Геологической службы США, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>). Групповые скорости волны Рэлея оцениваются в диапазоне от 2,3 до 3,5 км/с для периодов 20–100 с.

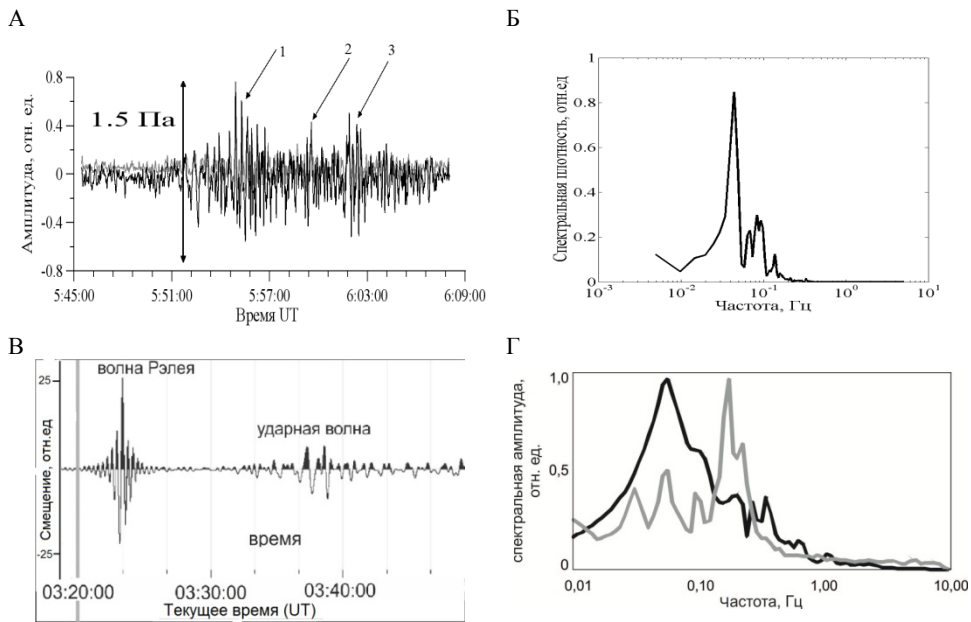


Рис. 3. Записи инфразвукового и сейсмического сигналов от Челябинского метеороида:

A – барограмма, полученная на станции «Торы» (стрелками показаны номера цугов); *B* – спектр первого цуга инфразвукового сигнала; *V* – поверхностная волна Рэлея и ударная волна, зарегистрированные на сейсмической станции «Арти» (расстояние от эпицентра – 252 км); *G* – спектр поверхностной волны (черная кривая) и ударной волны (серая кривая), зарегистрированных на сейсмической станции «Арти» (расстояние от эпицентра – 252 км)

На сейсмической станции Арти (международный код ARU, расстояние от эпицентра взрыва равно 252 км), помимо поверхностной сейсмической волны, также зарегистрирована ударная акустическая волна (рис. 3, *V*), что дает возможность оценить спектральные характеристики как сейсмического сигнала, так и сгенерировавшего его инфразвукового сигнала (рис. 3, *G*). Сейсмическая станция Арти входит в состав глобальной сети широкополосных сейсмических станций IRIS/Ida (Scripps Institution of Oceanography (1986): IRIS/IDA Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/II) и оборудована сейсмометром Streckeisen STS-1V/VBB. Рабочая полоса частот аппаратуры позволяет без искажений регистрировать сигналы от 10 Гц до 500 с.

Если рассматривать акустическую ударную волну от взрыва метеорита как источник возбуждения поверхностной сейсмической волны, то можно попытаться на качественном уровне оценить степень ответной реакции среды. Для этого следует оценить спектральное отношение входного параметра (инфразвукового сигнала) к выходному – сейсмическому сигналу. Таким образом, получим величину акустического импеданса для различных частот, характеризующего проводимость для акустических волн на границе «атмосфера – земная кора». На рисунке 4, А показаны спектры плотности мощности сейсмического и инфразвукового сигналов, полученных на сейсмической станции Арти, а также их отношение как показатель реакции среды на воздействие акустической ударной волны. Эта характеристика, или акустический импеданс, на границе «атмосфера – земная кора» имеет относительный максимум на частотах 0,15–0,3 Гц (период $T \sim 3\text{--}6$ с).

Полученное отношение спектров инфразвукового и сейсмического сигналов сопоставлялось со спектральным отношением горизонтальных и вертикальной компонент записей микросейсмических колебаний (Н/V–отношение), полученным на станции Арти (рис. 4, Б). Отношение Н/V является непосредственной характеристикой среды и показывает, в каких частотных диапазонах будет наблюдаться усиление колебаний сейсмических волн [8]. Анализ полученной кривой Н/V выявил набор характеристических частот: 0,11–0,45 Гц (периоды 2,2–9,1 с), 2,00 Гц (0,5 с) и 3,00 Гц (~0,3 с). Характеристические частоты 0,11–0,45 Гц хорошо согласуются с частотами, восстановленными из отношения спектров инфразвукового и сейсмического сигналов (рис. 4).

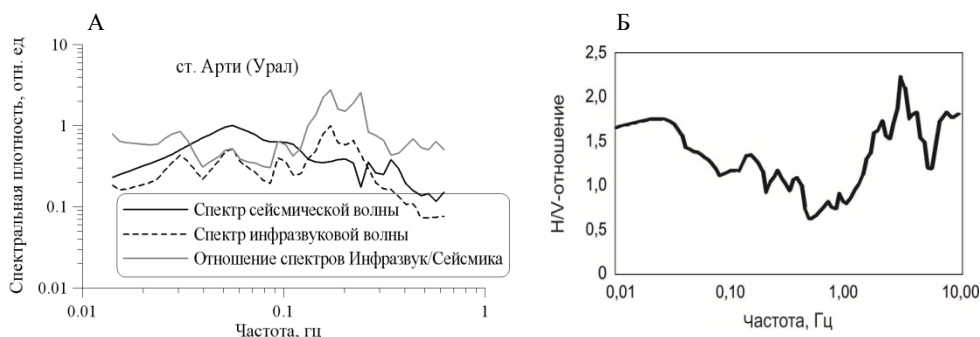


Рис. 4. Графики спектров инфразвукового и сейсмического сигналов Челябинского метеороида, полученные на сейсмической станции «Арти», их отношение (А) и кривая отношения спектральных плотностей компонент микросейсмического шума Н/V (Б)

Заключение

В работе обобщены некоторые результаты регистрации инфразвуковых и сейсмических наблюдений импульсных событий и землетрясений. Предложена методика оценки состояния сейсмической среды на основе анализа акустического импеданса атмосферной и земной сред. Анализ отношения

спектральных плотностей мощности для инфразвукового и сейсмического сигналов демонстрирует, что этот параметр может характеризовать отклик сейсмической среды на импульсное акустическое воздействие, как в случае падения Челябинского метеороида 2013 г., так и в случае землетрясений умеренной силы. Изучение отношений спектральных плотностей мощности инфразвукового и сейсмического сигналов показало, что оценка акустического импеданса среды удовлетворительно совпадает с оценкой спектрального отношения амплитуд горизонтальных и вертикальных компонент микросейсм.

Список литературы

1. *Афраймович Э. Л.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова. – Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
2. *Голицын Г. С.* Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере / Г. С. Голицын, Г. И. Григорьев, В. П. Докучаев // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1977. – № 13(9). – С. 926–935.
3. Челябинский метеороид: сейсмические эффекты / А. А. Добрынина, В. В. Чечельницкий, Е. Н. Черных, В. А. Саньков // Вестн. НЯЦ РК. – 2014. – № 2. – С. 105–109.
4. *Садовский М. А.* К вопросу об энергетической классификации землетрясений / М. А. Садовский, О. К. Кедров, И. П. Пасечник // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 2. – С. 3–10.
5. Сейсмический эффект подземных взрывов и проблема оценки полной энергии землетрясений / М. А. Садовский, О. К. Кедров, В. А. Лаушкин, И. П. Пасечник // Докл. АН СССР. – 1985. – № 281(4). – С. 825–829.
6. *Сорокин А. Г.* Инфразвуковое излучение Челябинского метеорита / А. Г. Сорокин // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2016. – № 80(1). – С. 101–105.
7. Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors / A. Le Pichon, L. Ceranna, C. Pilger, P. Mialle, D. Brown, P. Herry, N. Brachet // Geoph. Res. Let. – 2013. – N 40. – P. 3732–3737.
8. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface / Y. Nakamura // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – N 30(1). – P. 25–33.
9. *Revelle D. O.* Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves / D. O. Revelle // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1997. – N 822. – P. 284–302.
10. *Rudenko G. V.* Calculation of ionospheric effects due to acoustic radiation from an underground nuclear explosion / G. V. Rudenko, A. M. Uralov // J. Atm. Terr. Phys. – 1995. – N 57(3). – P. 225–236.

Comparative Analysis of Seismic and Infrasonic Signals During Pulsed Events And Earthquakes

A. G. Sorokin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS

A. A. Dobryнина

Institute of the Earth's Crust SB RAS

Abstract. This paper relies on data from recording of acoustic and seismic signals from pulsed sources and an earthquake. We consider that an acoustic shock in the atmosphere

triggers a strong seismic surface wave whose parameters are associated with a characteristic of the upper layer of a section of the earth's crust in case of a pulsed source. In case of an earthquake, an acoustic signal in the atmosphere is caused by a seismic wave also passing through the upper layer of a section of the earth's crust.

We described an amplitude and frequency characteristic (AFC) of the upper layer of a section of the earth's crust for a passing acoustic wave, as with the Chelyabinsk meteoroid, and a seismic wave, as with December 5, 2014 earthquake near Lake Khubsugul (Mongolia), using a method of spectral ratios H/V of horizontal and vertical components of microseismic noise. An AFC of a medium clearly indicates characteristic frequencies at which a seismic or acoustic response of the medium to a pulse signal is possible.

For analysis and comparison of response signals, we used observations of simultaneous infrasonic and seismic effects during 2013 Chelyabinsk meteoroid fall and December 5, 2014 Khubsugul earthquake ($K = 13,9$).

We concluded that seismic signal frequencies closely matched local characteristic frequencies of a spectral ratio H/V of microseismic noise components, determined independently, in case of an acoustics shock of the Chelyabinsk meteoroid explosion. But in case of December 5, 2014 earthquake, characteristic frequencies of microseismic noise do not agree with frequencies of an acoustic signal spectrum. The reason could be that in case of the earthquake a source is of a significantly larger scale; therefore, another mechanism of generation of an acoustic signal is involved.

Keywords: atmosphere, acoustic impedance, earthquake, infrasound, meteorite, industrial explosion, seismic wave, nuclear explosion.

References

1. Afraimovich E.L., Perevalova N.P. GPS-monitoring Earth's upper atmosphere [*GPS-monitoring verhney atmosferyi Zemli*]. Irkutsk, Publishing House of the State Scientific Center PBX ESSC SB RAMS, 2006. 480 p.
2. Golitsyn G.S., Grigoriev G.I., Dokuchaev V.P. Radiation of acoustic gravity waves during the motion of meteors in the atmosphere *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Fizika atmosferyi i okeana* [*Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*], 1977, no 13(9), pp. 926-935 (in Russian).
3. Dobrynina A.A., Chechelitsky V.V., Chernykh E.N., Sankov V.A. Chelyabinsk meteoroid: seismic effects. *Vestnik NYATS RK* [NNC RK Bulletin], 2014, no 2, pp. 105-109 (in Russian).
4. Sadovsky M.A., Cedars O.K., Pasechnik I.P. On the question of energy classification of earthquakes *Izvestiya, Fizika Zemli* [*Izvestiya, Physics of the Solid Earth*], 1986, no 2, pp. 3-10 (in Russian).
5. Sadovsky M.A., Cedars D.C., Laushkin V.A., Pasechnik I.P. The seismic effects of underground explosions and the problem of assessing the total energy of earthquakes *Doklady Akademii nauk SSSR* [*Doklady Earth Sciences*], 1985, no 281(4), pp. 825-829 (in Russian).
6. Sorokin A.G. Infrasonic radiation Chelyabinsk meteorite *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics], 2016, no 80(1), pp. 101-105 (in Russian).
7. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., Brachet N. Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophysical Research Letters*, 2013, no 40, pp. 3732-3737.
8. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1989, no 30(1), pp. 25-33.

9. Revelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1997, no 822, pp. 284-302.

10. Rudenko G.V., Uralov A.M. Calculation of ionospheric effects due to acoustic radiation from an underground nuclear explosion. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1995, no 57(3), pp. 225-236.

Сорокин Александр Григорьевич
кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952)428265
e-mail: sor@iszf.irk.ru

Sorokin Alexander Grigorevich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Researcher Scientist
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952)428265
e-mail: sor@iszf.irk.ru

Добрынина Анна Александровна
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952)426900
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Dobrynina Anna Alexandrovna
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Researcher Scientist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952)426900
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru