

УДК 550.34

## О НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПЕРИОДЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

© 2010 г. Б. М. Шевцов, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина

Представлено академиком В. А. Акуличевым 28.05.2009 г.

Поступило 01.06.2009 г.

Как показали наблюдения, на Камчатском геофизическом полигоне растет интенсивность и изменяется направленность приповерхностной геоакустической эмиссии в суточном временном интервале перед сильными сейсмическими событиями [1, 2]. Этот акустический эффект наиболее ярко проявляется в килогерцевом диапазоне частот и определяется деформациями горных пород в пунктах наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений [3]. Заметные повышания деформаций на таких расстояниях подтверждаются модельными представлениями [4–6].

Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, то преобладают сдвиговые источники акустической эмиссии. В работах [7, 8] показано, что ориентация сдвиговых источников обусловлена направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных преимущественно под углом  $45^\circ$  к оси наибольшего сжатия. При этом максимумы продольных акустических колебаний приходятся на направления, перпендикулярные этой оси для волны сжатия и совпадающие с ней для волны разряжения. Как правило, волна сжатия по интенсивности больше волны разряжения, что связано с особенностями процессов разрушения и диссипации энергии. Диаграмма направленности поперечных колебаний повернута на  $45^\circ$  относительно диаграммы направленности продольных волн.

С помощью селекции колебаний по поляризации и анализа направленности излучения можно оценить положение главной оси сжатия и выделить направление на источник деформационных возмущений, а по интенсивности эмиссии определить уровень напряжения. Это возможно, если

источник локализован и диаграмма направленности излучения имеет ярко выраженную анизотропию. Как показано ниже, эти условия выполняются в наблюдениях приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии.

Селекция продольных колебаний осуществляется естественным образом при регистрации геоакустических сигналов в естественных или искусственных водоемах, поскольку поперечные колебания в воде не распространяются. Для анализа направленности акустического излучения можно использовать комбинированные приемники, позволяющие измерить давление и три компоненты вектора ускорения, связанные с градиентом давления. При обработке этих четырех сигналов определяются колебательная скорость и плотность мощности акустического излучения [9].

При регистрации сигналов в твердых телах задача селекции упругих колебаний по поляризациям усложняется, и для ее решения требуется комплекс пространственно разнесенных векторных приемников.

В экспериментах на Камчатке использовался комбинированный векторный приемник производства ЗАО “Геоакустика” при ФГУП ВНИИФТРИ, представляющий собой сферическое тело диаметром 6 см с нейтральной плавучестью в водной среде. В соответствии с его размером он оптимизирован для работы на частотах несколько килогерц и ниже. Приемник был установлен на озере Микижа у дна на глубине около 5 м [10, 11]. Размеры водоема  $200 \times 700$  м.

В работе [1] показано, что сигналы геоакустической эмиссии представляют собой поток релаксационных импульсов с ударным возбуждением длительностью не более десятка миллисекунд, с частотами заполнения несколько килогерц. Частота следования импульсов составляет примерно 1 Гц и достигает десятков и даже сотен импульсов в секунду в периоды акустических возмущений, предшествующих сейсмическим событиям.

В работе [3] показано, что источниками возмущений приповерхностной высокочастотной гео-

*Институт космических исследований  
и распространения радиоволн  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук,  
с. Паратунка Елизовского района Камчатского края*

акустической эмиссии являются деформационные подвижки, относительные смещения которых  $10^{-7}$ – $10^{-6}$ .

Скорость смещения  $V_r$  в подвижках, которые создают акустическую эмиссию, равна примерно скорости поперечных колебаний  $V_s$  [8]. Подвижки с меньшими скоростями смещений излучают акустические колебания с меньшей эффективностью, поэтому их можно не рассматривать. В осадочных породах скорость продольных колебаний  $V_p \approx 1.8$ – $2.5$  км/с [12], а отношение  $\frac{V_p}{V_s} \approx 1.73$  [13], что дает  $V_r \approx 1$ – $1.5$  км/с.

Размеры  $l = \frac{V_r}{f}$  источников геоакустической эмиссии, излучающих в диапазоне частот  $f = 1$ – $18$  кГц, находятся в интервале  $l \approx 0.05$ – $1.5$  м. Надо отметить, что использованный приемник оптимизирован для регистрации акустической эмиссии источников с указанными выше размерами, нижняя граница которых по существу совпадает с диаметром датчика. При работе на более низких частотах применяются векторные приемники с большими размерами [9].

Согласно наблюдаемому времени затухания импульсов  $0.01$ – $0.015$  с и скорости продольных колебаний в осадочных породах  $V_p \approx 1.8$ – $2.5$  км/с расстояние ослабления сигнала находится как произведение этих величин и составляет  $18$ – $37$  м. Это расстояние соответствует размеру области, в пределах которой находятся источники акустических сигналов, регистрируемых приемником в килогерцевом диапазоне. При этом коэффициент ослабления сигнала (его амплитуды в  $e$  раз) равен обратной величине соответствующего расстояния  $0.03$ – $0.06$  м<sup>-1</sup>, а при пересчете неперов в децибелы получается  $230$ – $480$  дБ/км, что характерно для осадочных пород [14].

Для автоматизации процесса обнаружения и определения направления на источник излучения геоакустических импульсов разработан программно-вычислительный комплекс [15]. При оценке по данным наблюдений анизотропии направленности акустического излучения использовали понятия интегральной  $\Omega(t)$  и дифференциальной  $D(\omega, t)$  геоакустической активности. Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов в определенном интервале амплитуд  $dA$ , а вторая – распределение частоты следования этих импульсов по направлениям  $d\omega$  в нижней полусфере. Интеграл по углу отклонения от нормали к земной поверхности дает азимутальное распределение частоты следования импульсов  $D(\alpha, t)$  по направлениям  $d\alpha$ .

Нормированные распределения импульсов

$$d(\omega, t) = \frac{D(\omega, t)}{\Omega(t)}, \quad d(\alpha, t) = \frac{D(\alpha, t)}{\Omega(t)}$$

будут соответственно объемной и азимутальной диаграммами направленности излучения. Распределения можно разбить на суммы диаграмм направленности для импульсов с положительным и отрицательным вступлением, например,

$$D(\alpha, t) = D_+(\alpha, t) + D_-(\alpha, t),$$

где нижние индексы обозначают характер вступления.

При анализе импульсов рассматривали форму огибающей сигнала и определяли его вступление. По максимальным значениям огибающей находили амплитуду сигнала и выделяли импульсы в определенном интервале амплитуд  $dA$ . Вследствие фрактальных свойств геосред сигналы акустической эмиссии, как и их источники, подобны в различных масштабных интервалах [1], поэтому достаточно ограничиться рассмотрением выделенного интервала амплитуд  $dA$ .

Отношение частоты следования импульсов с положительным вступлением к частоте сигналов с отрицательным началом колеблется от 2 до 10, поэтому в первом приближении можно не раскладывать диаграмму направленности геоакустической эмиссии на составляющие, различающиеся характером вступления. Неравенство потоков импульсов начального сжатия и разряжения обусловлено, как отмечалось выше, особенностями процессов разрушения и диссипации энергии.

Анизотропию направленности геоакустической эмиссии исследовали как в спокойные (фоновые) периоды, когда отсутствовали деформационные и метеорологические возмущения, так и при росте интенсивности эмиссии перед сейсмическими событиями. Непрерывные наблюдения в период с августа 2007 г. по август 2008 г. позволили построить график сезонных изменений геоакустической активности  $\Omega(t)$  (рис. 1) с усреднением в суточном временном интервале. Ее поведение хорошо аппроксимируется синусоидой, максимум которой приходится на осень, а минимум – на весну. Можно отметить сезонные и годовые вариации акустической активности, а также заметную повторяемость ее локальных максимумов, что, видимо, определяется метеорологическими факторами.

На фоне плавных сезонных изменений возникают кратковременные (в течение суток) интенсивные возмущения геоакустической эмиссии, связанные с деформационной активностью.

На рисунке 2 приведены азимутальные распределения геоакустической активности  $D(\alpha, t)$  за периоды: ноябрь 2007 г. – февраль 2008 г. и май–июнь 2008 г. В этих интервалах времени для усреднения выбирали дни, когда отсутствовали деформационные и атмосферные возмущения.

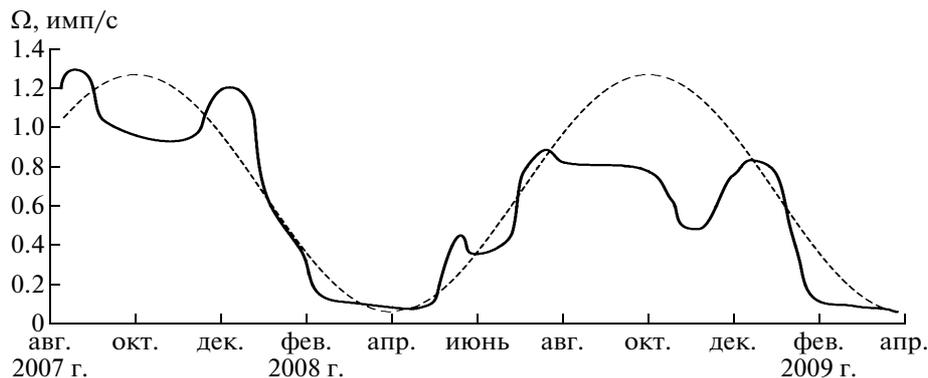


Рис. 1. Сезонные изменения геоакустической активности  $\Omega(t)$  (сплошная линия) и график синусоиды для сравнения (штриховая).

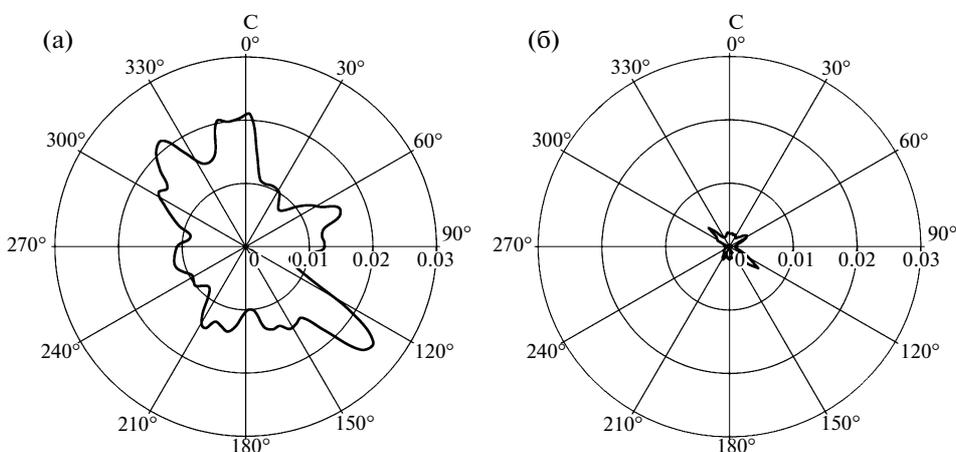


Рис. 2. Диаграммы азимутального распределения геоакустической активности  $D(\alpha, t)$ , имп/(градус · с), в спокойные дни временных периодов: ноябрь 2007 г. – февраль 2008 г. (а), май–июнь 2008 г. (б).

Средняя геоакустическая активность в первый период составила 0.63 имп/с, а во второй 0.14 имп/с.

Как видно из представленных на рис. 2 диаграмм, в спокойные дни направленность геоакустических импульсов анизотропная, в обоих случаях регистрируется повышенная активность с юго-востока и северо-запада и структура дополнительных лепестков во многом повторяется. Различия в активности эмиссии, согласно рис. 1, имеют сезонный характер.

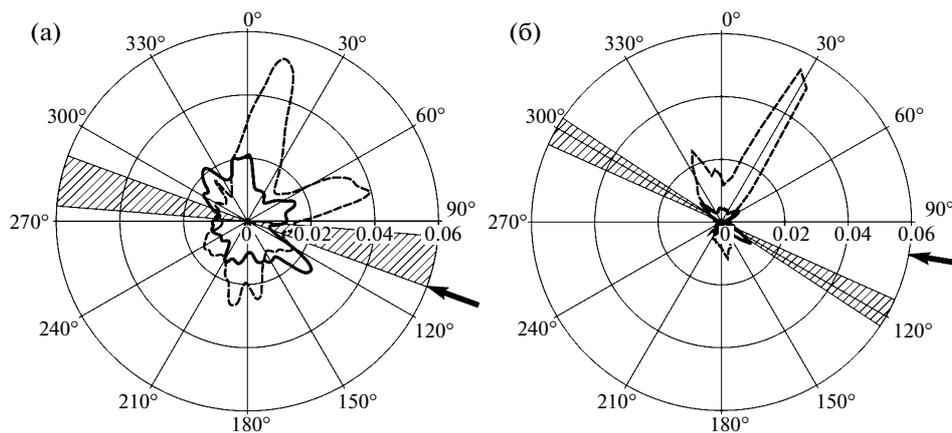
По множеству нерегулярно расположенных лепестков диаграмм направленности эмиссии на рис. 2 можно судить о сложном характере напряжений, а по асимметрии расположения максимумов излучения можно сделать вывод о неоднородности свойств среды вокруг точки наблюдений.

Из сравнения двух распределений видно, что структура диаграммы направленности эмиссии хорошо сохраняется, что указывает на сезонное по-

стоянство характера напряжений и объемного распределения источников акустического сигнала.

На рисунке 3 представлены два примера анизотропии направленности геоакустической эмиссии, усредненной в суточном временном интервале перед сейсмическими событиями 15 декабря 2007 г. и 15 мая 2008 г. В обоих случаях анизотропия направленности излучения усилилась, максимальные уровни геоакустической эмиссии приходятся на направления  $15^\circ$  и  $30^\circ$ , которые были активными и в спокойные периоды, но не выделялись сильно над средним уровнем. Получается, что в периоды деформационных возмущений активность этих направлений существенно возрастает.

Оценка ориентации оси наибольшего сжатия как направления, перпендикулярного положению максимума акустического излучения, показывает, что в обоих случаях ось не совпадала с направлениями на эпицентры готовящихся землетрясений.



**Рис. 3.** Примеры диаграмм азимутального распределения геоакустической активности  $D(\alpha, t)$ , имп/(градус · с), (штриховая линия), усредненной в суточном временном интервале перед землетрясениями: а – 15 декабря 2007 г. в 09<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT, энергетический класс 11.6, координаты гипоцентра 52.34°N, 160.61°E, глубина 10 км, эпицентрального расстояние 175 км, азимут 110°; б – 15 мая 2008 г. в 05<sup>h</sup>49<sup>m</sup> UT, энергетический класс 11.1, координаты гипоцентра 52.7°N, 160.06°E, глубина 41 км, эпицентрального расстояние 127 км, азимут 100° (данные КФ ГС РАН). Сплошной линией показан фоновый уровень эмиссии, заштрихованные области – оценка ориентации оси наибольшего сжатия, стрелками показаны азимуты землетрясений.

Однако наличие вторых максимумов на диаграммах говорит о том, что проявлялись еще и другие направления в деформациях. Динамика ориентации оси наибольшего сжатия показывает, что основные и второстепенные направления работают попеременно. При этом в хаотических блужданиях оси наблюдаются два метастабильных состояния вокруг направления на эпицентр землетрясения, которые соответствуют двум лепесткам диаграммы направленности эмиссии на рис. 3. Характер этих блужданий, по всей видимости, определяется источниками деформационных возмущений и неоднородностями среды вокруг точки наблюдений.

Таким образом, рассмотрены изменения направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений в суточном временном интервале перед сильными сейсмическими событиями на Камчатке. Показано, что при росте интенсивности эмиссии более чем на порядок возникают ярко выраженные максимумы в направленности продольных акустических колебаний. По их положениям можно определить ориентацию главной оси сжатия, в хаотических блужданиях которой наблюдаются два метастабильных состояния вокруг направления на эпицентр землетрясения.

Исследования выполнены по Программе Президиума РАН № 16, подпрограмма 3, и при поддержке проекта ДВО РАН 09–III–А–02–043.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 4. С. 1–14.
2. Купцов А.В. // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59–65.
3. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. и др. // ДАН. 2007. Т. 413. № 5. С. 96–100.
4. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 7–44.
5. Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. // Вычисл. сейсмология. 2001. В. 32. С. 81–97.
6. Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н. и др. // Мат. моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 59–64.
7. Виноградов С.Д. Исследование по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 67–74.
8. Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г. и др. Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 129–140.
9. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
10. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др. // ДАН. 2006. Т. 407. № 5. С. 669–672.
11. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. // Акуст. журн. 2008. № 54. С. 97–109.
12. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.
13. Славина Л.Б. Исследование по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 217–236.
14. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 580 с.
15. Маранулец Ю.В., Щербина А.О. // Техн. акустика. 2008. Т. 14. <<http://www.ejta.org>>.