

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии приемным модулем на базе векторного приемника

В. А. Гордиенко^{1a}, Т. В. Гордиенко², Ю. В. Марапулец^{3b}, А. О. Щербина³

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, ¹кафедра акустики; ²кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) Дальневосточного отделения РАН. Россия, 684034, Камчатская обл., Елизовский р-н, с. Паратунка.

E-mail: ^avgord@list.ru, ^bmarpl@ikir.kamchatka.ru

Статья поступила 15.12.2008, подписана в печать 13.04.2009.

Обсуждаются методические особенности использования комбинированного приемника, регистрирующего одновременно в области малых волновых размеров акустическое давление и три взаимно ортогональных компонента его градиента, для регистрации сигналов геоакустической эмиссии, аномалии которой могут выступать в качестве оперативных предвестников землетрясений. Возможные подходы к решению этой задачи рассматриваются на примере анализа таких аномалий, приуроченных к сильным сейсмическим событиям на Камчатке.

Ключевые слова: комбинированный приемник, геоакустическая эмиссия, оперативные предвестники землетрясений.

УДК: 550.34.094:534.23. PACS: 91.30.P-.

Введение

Предсказание землетрясений — одна из актуальнейших современных проблем. Результаты исследований, которые начиная с 2003 г. проводятся нами в сейсмоактивной зоне полуострова Камчатка, позволяют надеяться, что для определенных районов эта проблема может быть частично решена. Ранее, в работе [1], мы уже сообщали об обнаруженному нами новом эффекте — существовании аномалий высокочастотных (4–11 кГц) геоакустических шумов, обусловленных напряжениями, возникающими при подготовке сильных сейсмических событий, и выступающих в качестве оперативных предвестников готовящегося землетрясения. Под аномалиями мы понимаем повышение на два-три порядка частоты следования импульсов сигналов геоакустической эмиссии (ГАЭ) в выбранном частотном диапазоне заполнения этих импульсов. До наших работ серьезных исследований сигналов ГАЭ в указанном частотном диапазоне не проводилось, так как эта частотная область традиционно считалась малоинформативной в связи с сильным затуханием высокочастотных сигналов в грунте [2].

Согласно полученным нами статистическим данным почти для сотни сейсмических событий, образование крупных трещин с низкочастотным заполнением импульсных сигналов ГАЭ (считается, что размер трещины r изменяется обратно пропорционально частоте заполнения импульса и при ее значении $f = 3$ кГц составляет, по оценкам, приведенным в работе [3], около 1 м), предваряющих землетрясение, — событие относительно редкое, в то время как аномальное увеличение числа образующихся трещин и разломов с излучением сигналов ГАЭ, имеющих частоту заполнения более 5 кГц, наблюдалось нами более чем для 75% событий с энергетическим классом $K_S > 10-11$. При этом отсутствие регистрации высокочастотных сигналов заполнения для остальных событий в точках наблюдений, возможно, связано лишь с наличием разломов между точкой наблю-

дения и эпицентром землетрясения [4]. Таким образом, увеличение числа приемных систем и пространственное их разнесение, возможно, позволит существенно увеличить процент наблюдения таких аномалий сигналов ГАЭ.

Пример проявления одной из характерных аномалий ГАЭ в различных частотных диапазонах приведен на рис. 1. Появление аномальных шумов происходит, как правило, примерно в суточном временном интервале перед сильными сейсмическими событиями с энергетическим классом $K_S > 10-11$. Продолжительность аномалий варьируется от десятков минут до нескольких часов.

За счет сильного затухания в грунте регистрируемые приемной системой высокочастотные сигналы не могут генерироваться в зоне субдукции готовящегося землетрясения. По существу, они являются вторичными эффектами подготовки землетрясений и обусловлены трещинообразованием под действием деформаций [2], которые распространяются из очага землетрясения и создают вблизи пунктов наблюдений в эпицентральной области сдвиговые напряжения, определяющие преимущественную ориентацию трещин. Как следствие появляется направленность колебательного движения частиц среды с переносом акустической энергии в направлении от зоны субдукции и очага готовящегося землетрясения. Дальность распространения области трещинообразования и напряженность деформаций определяются размером очага. Для землетрясений с $K_S > 10-11$ эти сигналы могут регистрироваться на расстояниях до 200–250 км от эпицентра готовящегося землетрясения [2]. Поскольку размеры вторичных трещин обычно сравнительно малы, вызванные ими упругие колебания находятся в более высокочастотной части спектра по сравнению с волнами, которые создаются основной фазой сейсмического события и поэтому выходят за границы используемых в традиционной сейсмологии частот.

По характеру движения частиц среды в волне (поляризации волны) можно осуществлять локацию областей подготовки сейсмических событий в горизонтальной

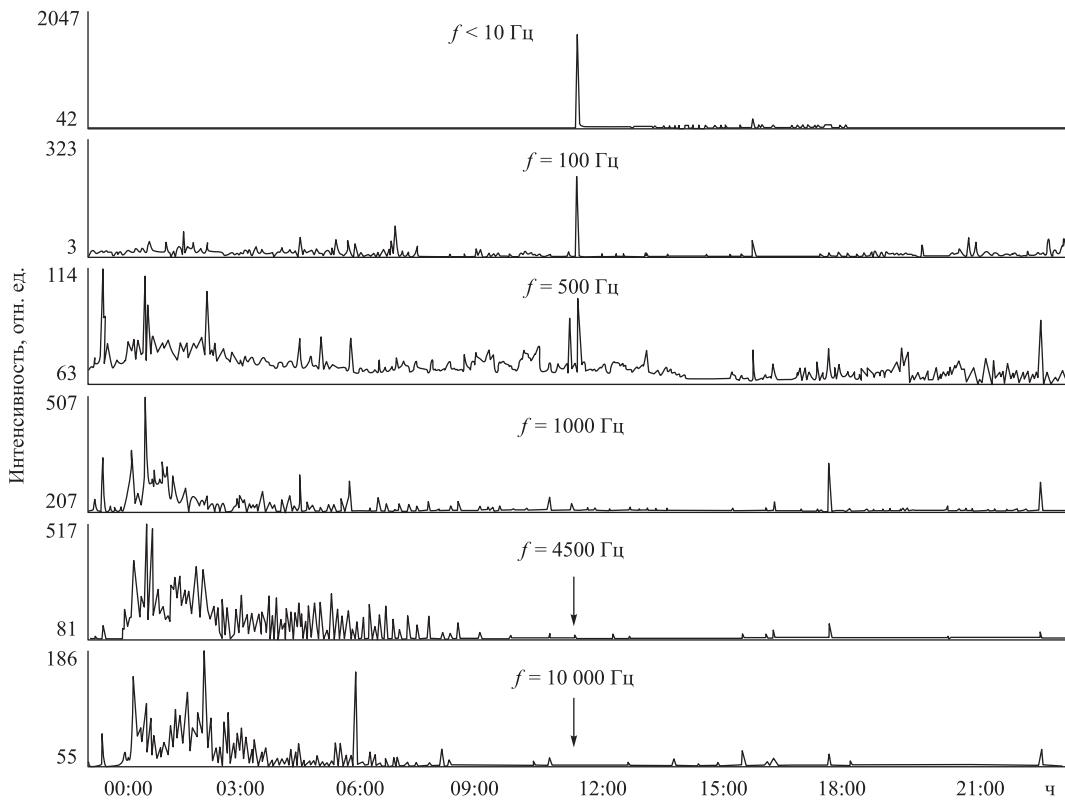


Рис. 1. Характерный вид интегральной энергии сигналов ГАЭ для частот ниже 10 Гц и в некоторых третьоктавных полосах анализа в период проявления ее аномалий, зарегистрированной на оз. Микижа перед событием 16 ноября 2004 г. ($K_s = 12.8$). Момент землетрясения показан стрелкой

плоскости. Для этого требуется регистрировать характер движения частиц среды в проекции на два горизонтальных взаимно ортогональных направления без каких бы то ни было амплитудно-фазовых искажений.

Методика

Для регистрации сигналов ГАЭ мы воспользовались высокочастотным комбинированным приемником (КП) [5], который позволял регистрировать одновременно в одной и той же точке пространства акустическое давление и три взаимно ортогональных компонента его градиента (или колебательной скорости частиц среды) в частотном диапазоне до 11 кГц. Согласование приемного модуля с грунтом на столь высоких частотах — задача трудоемкая. Поэтому при проведении описываемых экспериментов мы разместили КП в водной среде. Измерения проводились в сейсмоактивной зоне п-ова Камчатка в районе Авачинской губы. Одна из приемных систем была установлена вблизи дна оз. Микижа (площадь поверхности $200 \times 700 \text{ м}^2$, наибольшая глубина 4 м), вторая — в искусственном водоеме объемом $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$, в пункте комплексных геофизических наблюдений на р. Карымшина, на удалении 20 км к северу от оз. Микижа.

Безусловно, при переходе сигнала из грунта в воду некоторые специфические характеристики сейсмоакустического сигнала оказались утерянными. Однако общее направление прихода акустической энергии в горизонтальной плоскости сохранялось. Тем не менее сохранение информативной составляющей сигналов требует принятия дополнительных мер, обеспечивающих «правильную» регистрацию сигналов ГАЭ. Основная проблема заключается в том, что анализ информации возможен лишь

в течение очень короткого промежутка времени. Характерный сигнал, регистрируемый в воде КП, представляет собой череду достаточно коротких по времени ударных импульсов, весьма различающихся по амплитуде (рис. 2). Учитывая наличие реверберации, информативной с точки зрения определения направления на очаг готовящегося землетрясения оказывается лишь начальная часть этих импульсов, обычно не превышающая 1–2 периодов (рис. 2, а, б). Поэтому применяемые в гидроакустике методы пеленгования с использованием БПФ с последующим времененным усреднением [5] оказываются малоэффективными.

Один из наиболее простых и вместе с тем эффективных подходов к обработке информации заключается в анализе траекторий движения частиц среды на начальном участке соответствующего импульса [5]. Для его реализации требуется, чтобы частота дискретизации была достаточно высокой (порядка 15–25 отсчетов на период). При этом различие между фоновыми составляющими и сигналами порой может достигать 100 дБ и более, т. е. при цифровой регистрации сигналов необходимо использовать АЦП, имеющее не менее 24 разрядов. Это в свою очередь означает, что при необходимости организации непрерывной записи сигналов ГАЭ с частотой заполнения 11–12 кГц в течение длительного времени нужны значительные объемы памяти. Кроме того, для правильной обработки требуется считывание информации с отдельных каналов звукоприемника с задержкой не более десятка микросекунд между любой парой каналов КП минимум для 8 каналов регистрации (т. е. хотя бы двух разнесенных в пространстве приемных систем на базе КП).

Наиболее просто эта проблема решается введением

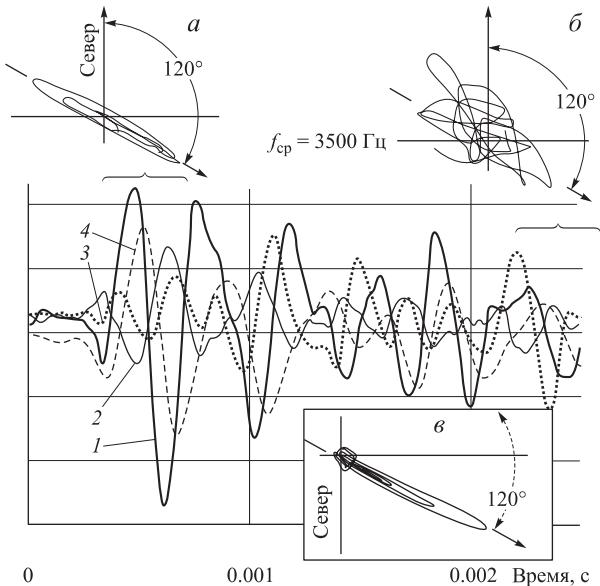


Рис. 2. Характерная траектория движения частиц среды (а, б) и пространственное распределение вектора Умова (в) в озере для одного из сигналов геоакустической эмиссии во время проявления ее аномалии 4 августа 2004 г.: а — начальный участок сигнала; б — область проявления реверберации. Цифрами обозначены каналы КП: 1 — X; 2 — Y; 3 — Z; 4 — P

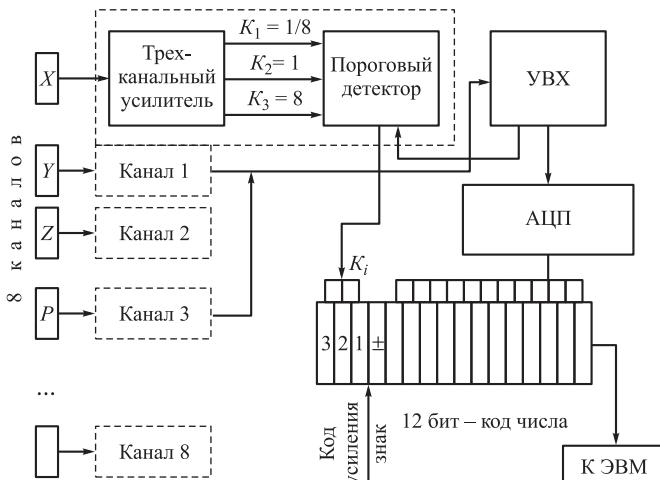


Рис. 3. Упрощенная блок-схема расширения динамического диапазона АЦП при цифровой записи сигнала

в каждый канал регистрации устройства выборки-хранения (УВХ) информации, запускаемого синхронно импульсом, поступающим с некоторого опорного генератора. Чтобы обеспечить необходимый динамический диапазон при одновременно длительной непрерывной записи большого объема информации в полевых условиях, была разработана и опробована схема записи, реализуемая на базе относительно недорогих энергоэкономичных малоразрядных АЦП с УВХ специальной конструкции на входе, упрощенный вариант блок-схемы которой приведен на рис. 3.

Конструкции УВХ обычно не вызывают проблем при правильном выборе комплектующих элементов. В предлагаемом варианте устройства считывание информации происходит синхронно, а затем с относительно небольшой скоростью эта информация по очереди записывается

в соответствующий блок памяти. Кроме того, используется искусственный прием расширения динамического диапазона. Сигнал с каждого канала поступает на вход трехканального усилителя. Коэффициенты усиления K_i подобраны таким образом, что изменение усиления эквивалентно переносу запятой в числе, записанном в двоичном коде. Для 16-разрядного АЦП коэффициенты удобно выбрать равными $1/8$, 1 и 8 . При использовании 12-разрядного АЦП соответственно $1/32$, 1 и 32 .

Пороговый детектор позволяет всегда применять для записи канал, в котором используется наибольшее количество значащих цифр АЦП, так что погрешность оцифровки снижается. В двух первых битах для 12-разрядного или трех для 16-разрядного АЦП записывается код коэффициента усиления. В результате динамический диапазон АЦП возрастает практически в 100 раз, т. е. на базе 12-разрядного АЦП (динамический диапазон не более 65–70 дБ) реализуется АЦП с динамическим диапазоном не менее 100 дБ, на базе 16-разрядного — более 120 дБ при использовании минимум 4 бит на отсчет.

Построение годографа колебательной скорости, определяющего направление переноса энергии сигналами ГАЭ, осуществлялось с помощью специальной программы. Поскольку наиболее интенсивными при распространении в воде являются преимущественно P -волны, при выраженной эллиптичности движения частиц среды направление распространения энергии определяет, как правило, большая ось эллипса траектории.

В рамках работы произведено устранение неоднозначности пеленга *вперед-назад*. Для этого мы использовали определение проекций на соответствующие координатные оси вектора Умова $I_i = P(t)V_i(t)$, характеризующего направление переноса энергии в волне. Здесь $P(t)$ и $V_i(t)$ — сигналы с выхода каналов акустического давления и проекций колебательной скорости на ось i ($i = x, y, z$). Далее определяется среднее значение вектора потока акустической мощности $\mathbf{W} = \int_0^{\tau} \mathbf{I}(t) dt = \int_0^{\tau} P(t) \mathbf{V}(t) dt$. На рис. 2, в приведено пространственное распределение вектора Умова.

Однако имеющиеся в нашем распоряжении высокочастотные КП измеряют градиент звукового давления, которое с точностью до константы связано с колебательной скоростью известным из акустики соотношением $\mathbf{V}(t) \sim -\int \text{grad } P(t) dt$. Формальное перемножение сигналов, регистрируемых каналом давления и каналом градиента давления, определяет только величину реактивной составляющей энергии. Для определения вектора Умова необходимо «широкополосно» проинтегрировать сигналы с выхода каналов градиента давления КП. Наиболее просто эта операция обычно осуществляется после выполнения БПФ. Применительно к сигналам ГАЭ из-за их существенной нестационарности данный способ практически неосуществим. Широкополосное численное интегрирование также представляет собой трудоемкий вычислительный процесс. Наиболее просто осуществить широкополосный сдвиг на 90° фазы сигнала, регистрируемого каналом давления КП, например путем численного дифференцирования зависимости $P(t)$. В этом случае направление произведения полученных сигналов будет совпадать с направлением вектора Умова. Однако при этом следует с осторожностью сравнивать энергетические характеристики импульсов с различной частотой заполнения по потоку акустической мощности.

Экспериментальные данные

В качестве иллюстрации приведены выборочные результаты анализа отдельных импульсов, отражающих наиболее общие обнаруженные закономерности. Выбранные дни наблюдений (6 и 11 февраля 2007 г.) соответствовали времени с имеющей место достаточно выраженной аномальной временной областью следования импульсов и за 5 дней до этого в период отсутствия аномалии (рис. 4, *a*). Наблюдавшаяся 11 февраля выраженная аномалия импульсов ГАЭ могла явиться признаком надвигающегося землетрясения, которое действительно последовало в ближайшие сутки. Это землетрясение представляло серию толчков, самый сильный из которых произошел на удалении около 120 км ($K_s = 11.8$).



Рис. 4. Сравнительные статистические характеристики фоновых импульсов ГАЭ (штриховая линия) и в период проявления аномалии (сплошная линия без заполнения) для пяти частотных полос: *а* — суммарное количество импульсов геоакустической эмиссии, зарегистрированное за одинаковый временной интервал; *б* — интегральная энергия сигналов геоакустической эмиссии за этот же промежуток времени; *в* — средняя энергия, приходящаяся на один импульс

На рис. 4, *б* приведены сравнительные значения полной энергии импульсов ГАЭ в тех же частотных диапазонах, что и на рис. 4, *а*, полученные путем суммирования квадратов амплитуд импульсов в каждом из выделенных частотных диапазонов. На рис. 4, *д* представлена средняя энергия, приходящаяся на один импульс для каждого частотного диапазона в период наблюдения аномалии и в ее отсутствие. Из приведенных зависимостей следует, что

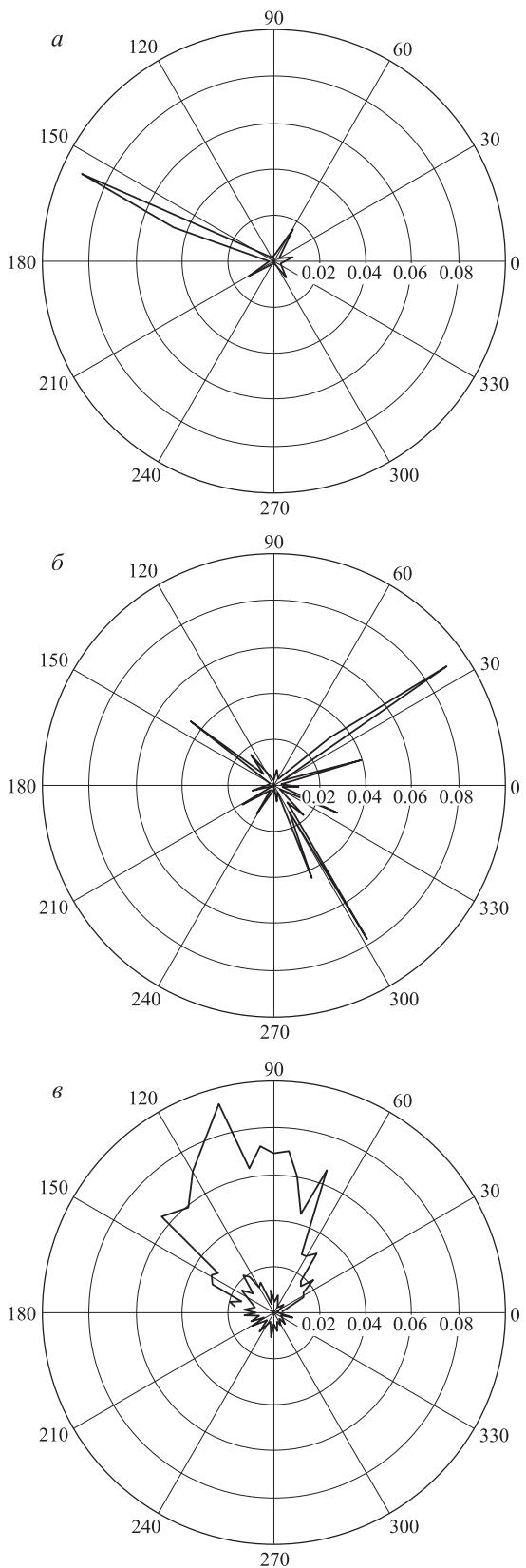


Рис. 5. Пример пространственного распределения направления прихода энергии импульсов ГАЭ: *а* — перед событием 12 февраля 2007 г. в период проявления аномалии; *б* — фоновые шумы для того же события; *в* — сравнение направленности прихода энергии фоновых шумов: 1 — в период проявления аномалии; 2 — перед событием 5 августа 2005 г. (в логарифмическом масштабе)

в период проявления аномалии энергия высокочастотных импульсов превышает почти в 2 раза аналогичную среднюю энергию импульсов в период наблюдения фона.

На рис. 5 представлены выборочные интегральные диаграммы направленности прихода акустических сигналов, определенные с учетом эллиптичности движения частиц в пределах примерно 20-минутной записи.

В период наблюдения аномалии пеленги группировались в диапазоне углов от 150 до 170° по отношению к направлению на север с максимумом в направлении, хорошо соответствующем последовавшему менее чем через сутки землетрясению (рис. 5, а). В период отсутствия аномалий наблюдался разброс значения пеленга (рис. 5, б). Величина разброса, как показала сравнительный анализ изучения фона перед другими землетрясениями с энергетическим классом $K_s > 10$, была различна в различное время. Наиболее часто разброс по углу достигал 50–60°, хотя иногда среднее направление прихода энергии оказалось близким к направлению на будущее землетрясение (рис. 5, в).

Таким образом, фон может быть как относительно сильно флюктуирующем по направлению, так и иметь достаточно хорошо выраженную направленность. Поэтому характерным признаком готовящегося землетрясения является не пространственная анизотропия прихода энергии сигналов ГАЭ фоновых шумов, а проявление их аномалий в высокочастотной области спектра. Именно в этот период анизотропия пространственного распределения энергии прихода сигналов указывает на область субдукции готовящегося события.

Заключение

Analysis of high frequency geoacoustics emission with the help of receiver module based on the vector receiver

V. A. Gordienko^{1a}, T. V. Gordienko², Yu. V. Marapulets^{3b}, A. O. Sherbina³

¹ Department of Acoustics; ² Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

³ Institute Cosmo-Physical Investigations and Wave Transmission, Far Eastern Division of Russian Academy of Sciences, Paratunka 684034, Township Elizovo, Kamchatka region, Russia.
E-mail: ^avgord@list.ru, ^bmarpl@ikir.kamchatka.ru.

Methodological features of using the combined receiver, which registers simultaneously in the region of small wave sizes both acoustic pressure and three mutually orthogonal components of its gradient, for registration of geoacoustic emission anomalies of which would be treated as operative earthquakes precursors are discussed. Possible ways of solving this problem are considered on example of analysis of such anomalies dated to strong seismic events in Kamchatka.

Keywords: combined receiver, geoacoustic emission, operative earthquakes precursors.

PACS: 91.30.P-

Received 15 December 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2009).

Сведения об авторах

1. Гордиенко Валерий Александрович — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: 939-29-69, e-mail: vgord@list.ru.
2. Гордиенко Татьяна Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.; тел.: 939-29-69, e-mail: tan-gor@mail.ru.
3. Марапулец Юрий Валентинович — канд. техн. наук, зам. директора по науке ИКИР ДВО РАН; тел.: 8(41531) 33-193, e-mail: marpl@ikir.kamchatka.ru.
4. Шербина Альберт Олегович — науч. сотр.; тел.: 8(41531) 33-193, e-mail: ikir@ikir.kamchatka.ru.

Особенностью данного метода является то, что если землетрясение происходит в плоскости геологического разлома земной коры, расположенного в непосредственной близости к приемной системе, то в суточном временном интервале до землетрясения возникают аномальные увеличения геоакустической активности с направлением прихода основной энергии с направлений, соответствующих геометрии этого разлома. В данном случае возможно предсказание направления на будущее землетрясение лишь в угловом секторе, характеризующем размеры разлома, являющегося причиной возникновения самого землетрясения. Поэтому выбор точек слежения за аномалиями ГАЭ требует дополнительных исследований, а для увереной их регистрации требуется сеть размещенных в пространстве приемных станций, работающих в диапазоне частот до 10–11 кГц.

Список литературы

1. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др. // Докл. РАН. 2006. **406**, № 6. С. 669.
2. Соболев А.Г., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М., 2003.
3. Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г. и др. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн // Физические процессы в очагах землетрясений. М., 1980. С. 129.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. // Акуст. журн. 2008. **54**, № 1. С. 97.
5. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М., 2007.