

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ РАННЕЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

© 2004 г. И. А. Ларионов, Б. М. Шевцов, А. В. Купцов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

При помощи двух систем направленных гидрофонов, размещенных в искусственном водоеме и озере, на Камчатке проводятся наблюдения за геоакустической эмиссией в частотном диапазоне 0.1...10000 Гц в целях изучения ее характеристик и изменений, соответствующих заключительной стадии подготовки сейсмических событий. Показано, что геоакустические шумы анизотропные, и интенсивность их возрастает в направлении зоны субдукции, находящейся на расстоянии 150...200 км от пунктов наблюдений. На фоне шумов регистрируются мощные акустические аномалии в килогерцовом диапазоне частот с превышением по уровню сигнала в десятки и сотни раз. Оценена возможность регистрации акустических сигналов этого диапазона непосредственно из областей подготовки сейсмических событий. За четырехлетний период наблюдений отобраны землетрясения с энергетическим классом больше 11 и гипоцентрами, расположенными не далее 200 км от пунктов регистрации. Из шестидесяти рассмотренных случаев тридцати сейсмическим событиям за 9-30 часов предшествовали интенсивные высокочастотные геоакустические аномалии, которые имели характерную форму сигнала и легко обнаруживались. В другие интервалы времени такие акустические аномалии не наблюдались. Определены зоны слышимости акустических аномалий.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно существующим представлениям о механизмах подготовки сейсмических событий, медленное и продолжительное сжатие горных пород сменяется быстрым ростом упругих напряжений, приводящих к лавинному трещинообразованию (Райс, 1982), которое сопровождается геоакустической эмиссией. В связи с возможностью ее использования для наблюдений за состоянием горных пород и выявления этапов подготовки землетрясений большое внимание уделялось исследованию ее характеристик в различных условиях (Соболев Г. А., 2003).

В последние годы сейсмоакустическая эмиссия регулярно наблюдается в скважинах (Беляков и др., 2002), туннелях (Горбатиков и др., 2001), на дне океана (Лаппо и др., 2003; Sassorova et al, 2003) и водоемов (Купцов и др., 2003). Исследуются, как фоновые характеристики акустических сигналов, так и аномалии, приуроченные к сейсмическим событиям.

Так, например, в Армении во время Спитакского землетрясения с магнитудой 7.1 в 80 км от эпицентра было зафиксировано увеличение интенсивности геоакустической эмиссии в диапазоне частот 800-1200 Гц за 12 часов до основного события и через 12 часов после (Моргунов и др., 1991). В Японии на сейсмологической обсерватории Мацуширо Метео-

рологического Агентства Японии, в туннеле на глубине 100 м была обнаружена акустическая аномалия на частотах 500 и 1000 Гц только в одном случае при землетрясении с магнитудой 4.5, с расстоянием до эпицентра 23.5 км и глубиной 10 км. (Горбатиков и др., 2001). Эти наблюдения выполнялись с помощью геофонов с верхней границей чувствительности по частоте 1200 Гц (Беляков, 1993).

Однако хорошо известно, что акустическая энергия трещинообразования выделяется и на значительно более высоких частотах (Крылов, 1983; Соболев Г. А., 2003; Чернышев, 1983). Исследования высокочастотных сейсмических шумов океана проводились с помощью стационарных гидроакустических систем установленных в нескольких километрах от берега на дне (Олещук, 1991), возможности которых, однако, ограничены океанскими шумами. В небольших естественных и искусственных водоемах уровни шумов значительно ниже, они, как правило, приходятся на частоты меньше 500 Гц и легко контролируемы (Купцов и др., 2003), поэтому проведение высокочастотных геоакустических наблюдений в таких средах может оказаться весьма результативным.

Основные сомнения в возможностях таких наблюдений связаны с сильным ослаблением высокочастотных сигналов. На частоте 3 кГц коэффициент ослабления акустических колебаний в осадочных породах

равен примерно 260 дБ/км, а в базальтах – всего 1.5 дБ/км. При этом длина ослабления сигнала (по амплитуде в e раз) составит 33 м и 5.9 км, соответственно. Если предположить, что акустические колебания проходят основное расстояние от источников по базальтам и только в точке приема преодолевают незначительный слой осадочных пород, то становится очевидной возможность наблюдения высокочастотных сигналов трещинообразования на больших расстояниях. С помощью использованных в данной работе приемников наблюдения в базальтах можно осуществлять на удалении до 50 км. Эту цифру можно увеличить, если учесть, что существуют волноводные условия распространения сигналов, понижающие их ослабление, и нелинейные механизмы преобразования слабозатухающих низкочастотных колебаний в высокочастотные сигналы, дальность обнаружения последних при этом возрастает. В области образования трещин плотность мощности столь высока, что нелинейные механизмы распространения сигналов на начальной стадии играют основную роль. Еще можно учесть, что деформации из будущих очагов землетрясений распространяются на десятки километров, в результате чего области трещинообразования могут находиться значительно ближе к точке приема, чем гипоцентры. Перечисленные выше факторы создают условия для проявления интенсивных высокочастотных акустических аномалий, сопровождающих процессы подготовки землетрясений с удалением гипоцентров до 100- 200 км, и определяют пространственное распределение их слышимости. Ниже будут



Рис. 1. Результаты калибровки гидрофона

рассмотрены такие распределения и связанные с ними вероятности обнаружения сигналов.

Данная работа посвящена исследованиям характеристик геоакустической эмиссии на Камчатке и анализу ее высокочастотных аномалий, приуроченных к сильным сейсмическим событиям.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для регистрации сигналов использовались две приемные системы, размещенные в небольших водоемах. Каждая система состояла из пяти совмещенных гидрофонов, ориентированных по сторонам света и вниз. Ширина диаграммы направленности каждого из гидрофонов составляла 60° , а средняя чувствительность с предусилителями в килогерцовом частотном диапазоне равнялась сотням мВ/Па (рис. 1). Преимущества гидрофонов над геофонами проявляются при исследовании высокочастотных шумов.

Система из пяти направленных приемников позволяет достаточно эффективно оценивать анизо-

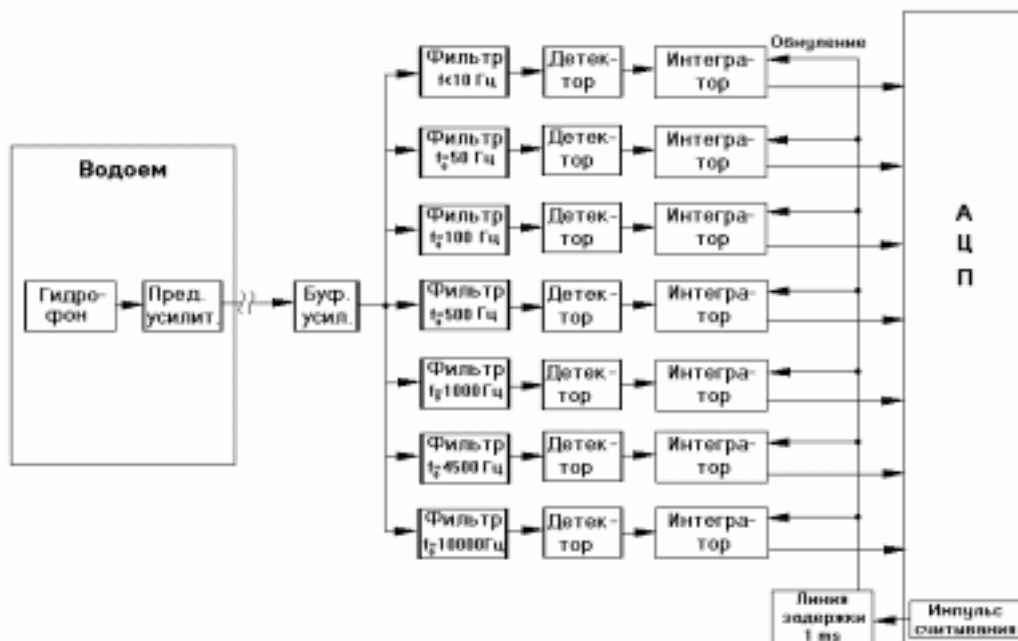


Рис. 2. Схема измерительного тракта.

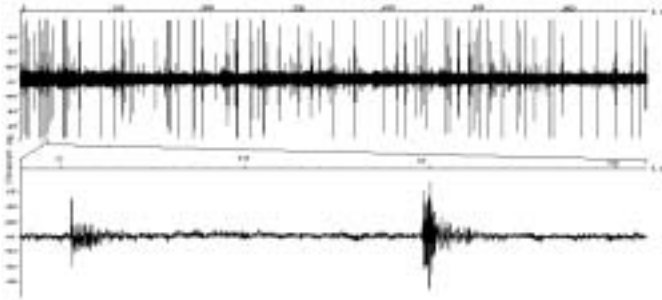


Рис. 3. Амплитуда сигнала геоакустического шума. По вертикальной оси давление в относительных единицах. На нижнем графике представлен 0.15 секундный фрагмент сигнала.

тропию шумов. Одна из таких систем была установлена в искусственном водоеме с размерами 2×22 м, оборудованном в пункте комплексных геофизических наблюдений на р. Карымшина, а другая располагалась с удалением 20 км к северу на о. Микижа, размеры которого 200700 м, а наибольшая глубина 5 м.

Регистрация акустических шумов со всех пяти направлений осуществлялась непрерывно через полосовые фильтры в семи частотных диапазонах ($0.1 \dots 10$, $10 \dots 50$, $50 \dots 200$, $200 \dots 700$, $700 \dots 1500$, $3000 \dots 6000$, $8000 \dots 11500$ Гц) и амплитудные детекторы в режиме четырехсекундного накопления с помощью интеграторов, сигналы с которых оцифровывались и записывались в компьютер (рис. 2).

Иногда для более детального анализа производилась непосредственная запись акустических шумов в течение суток на магнитограф в полосе частот $0.1 \dots 22000$ Гц. На р. Карамшина наблюдения проводятся с июля 1999 г., а на о. Микижа – с ноября 2001 г. Толщина осадочных пород в пунктах наблюдений не превышает $30 \dots 40$ м.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим особенности высокочастотной геоакустической эмиссии. Используемый метод наблюдений позволяет осуществлять непосредственную запись сигнала и его прослушивание. Надо заметить что, данный метод в геоакустике, в отличие от акустики океана, не получил еще широкого распространения. По своему многообразию подземные звуки не уступают океаническим. Прямое прослушивание бывает достаточно эффективным, оно сразу же дает хорошую предварительную информацию, которую не просто получить с помощью обработки. Например, акустическая аномалия похожа на грохот камнепада, который трудно с чем-либо спутать.

При детальном рассмотрении непосредственной записи акустического сигнала в фоновом режиме (рис. 3) обнаруживается достаточно простая его струк-

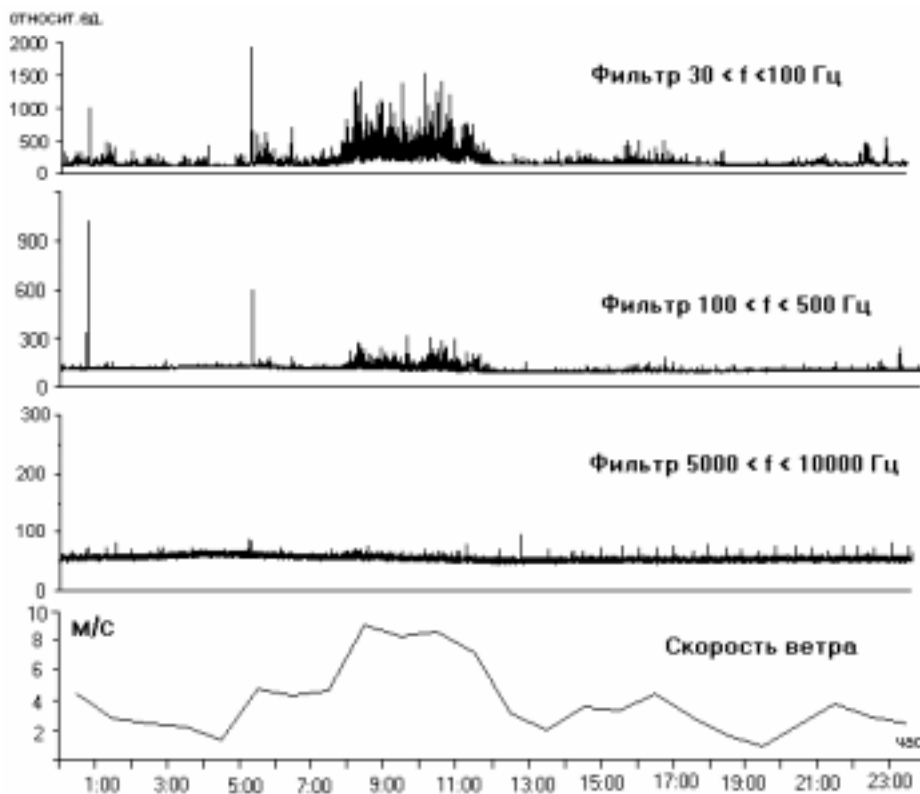


Рис. 4. Влияние скорости ветра на среднюю амплитуду шумов в различных частотных каналах.

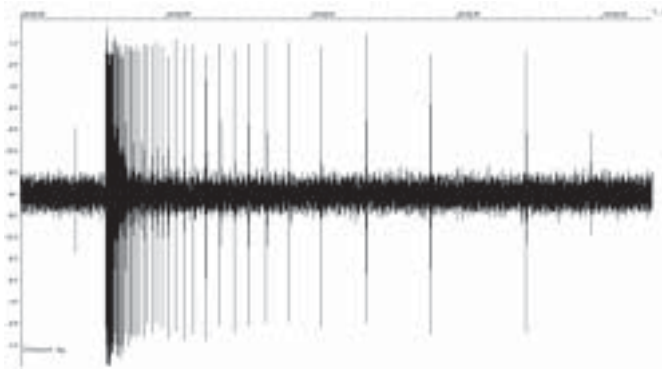


Рис. 5. Пример геоакустического сигнала, напоминающего скрип открывающейся двери.

тура, представляющая собой череду случайных импульсов с частотой заполнения 3 кГц. При наблюдаемом времени затухания 0.015 с и примерной скорости звука 5 км/с в земной коре длина ослабления сигнала на частоте 3 кГц получается 75 м. Коэффициент ослабления при этом будет 116 дБ/км, что ближе по свойствам к осадочным породам.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОНОВЫХ ШУМОВ

На о. Микижа северное направление всегда выделяется повышенной интенсивностью и нерегулярной временной изменчивостью шумов, в то время как по другим направлениям наблюдаются их относительно спокойные и регулярные суточные колебания. Эта анизотропия шумов, возможно, связана с близостью вулканов в северо-восточном секторе обзора и мыса

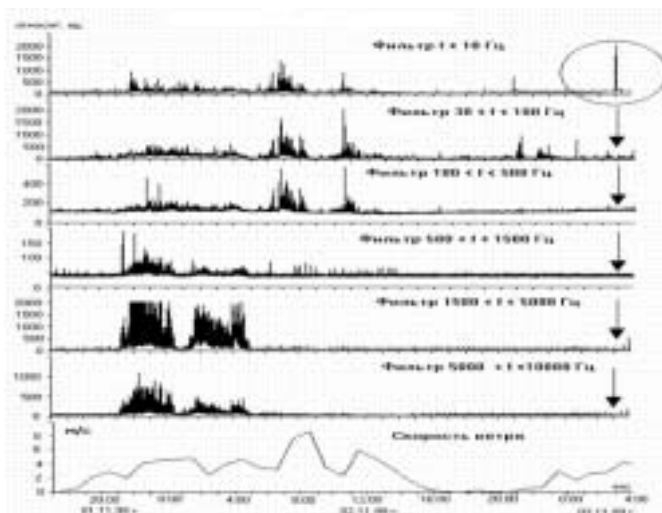


Рис. 6. Пример аномалии геоакустического сигнала предшествующей событию 3 ноября 1999 (класс 11.1, расстояние от точки регистрации 193 км, глубина гипоцентра 10 км.), отмеченного на рисунке стрелкой. Кружком отмечена реакция гидрофона на сейсмический сигнал события.

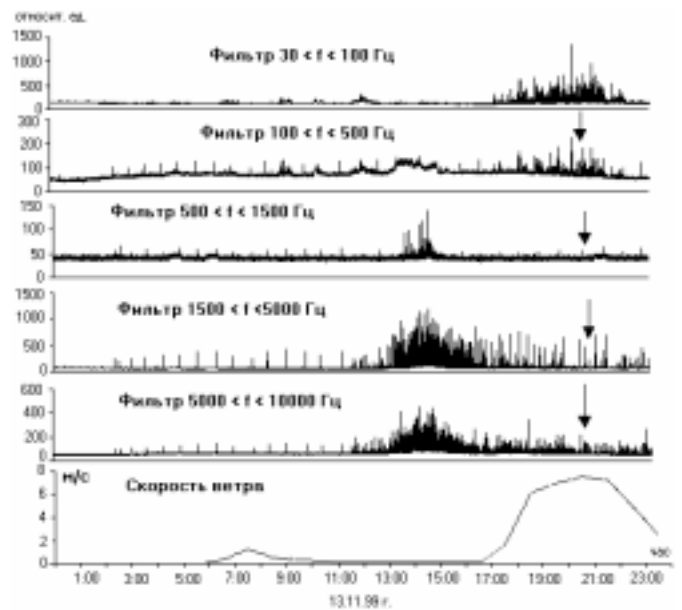


Рис. 7. Пример геоакустической аномалии, предшествующей событию 13 ноября 1999 (класс 12.1, расстояние от точки регистрации 141 км, глубина гипоцентра 11 км.), отмеченного на рисунке стрелкой.

Шипунского, у которого всегда отмечается повышенная сейсмическая активность.

На р. Карымшина всем направлениям свойственны повышенная интенсивность и нерегулярная временная изменчивость фоновых шумов, что обусловлено, видимо, особенностями геологического строения этого района. Пункт наблюдений располагается на пересечении двух разломов, один из которых генеральный. Кроме этого, в юго-восточном секторе обзора находится Мутновский вулкан.

В обоих пунктах наблюдений понижена интенсивность фоновых шумов с западного направления. В связи с малой его информативностью наблюдения в нем были прекращены, и более подробно исследовались сигналы с приемников, ориентированных на зону субдукции.

В диапазоне частот 30...500 Гц присутствуют метеорологические и техногенные помехи, которые в результате промерзания грунта сильнее сказываются в зимние периоды. Эти шумы низкочастотные и не мешают регистрации сигналов в килогерцовом диапазоне (рис. 4).

АНОМАЛИИ В АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

Как показывает визуальный анализ сигналов, все многообразие подземных звуков складывается из всевозможных комбинаций импульсов. Регистрируются отдельные щелчки, скрипы, гулы, вздохи, имитации падения жидкой капли и т. п. Пример коле-

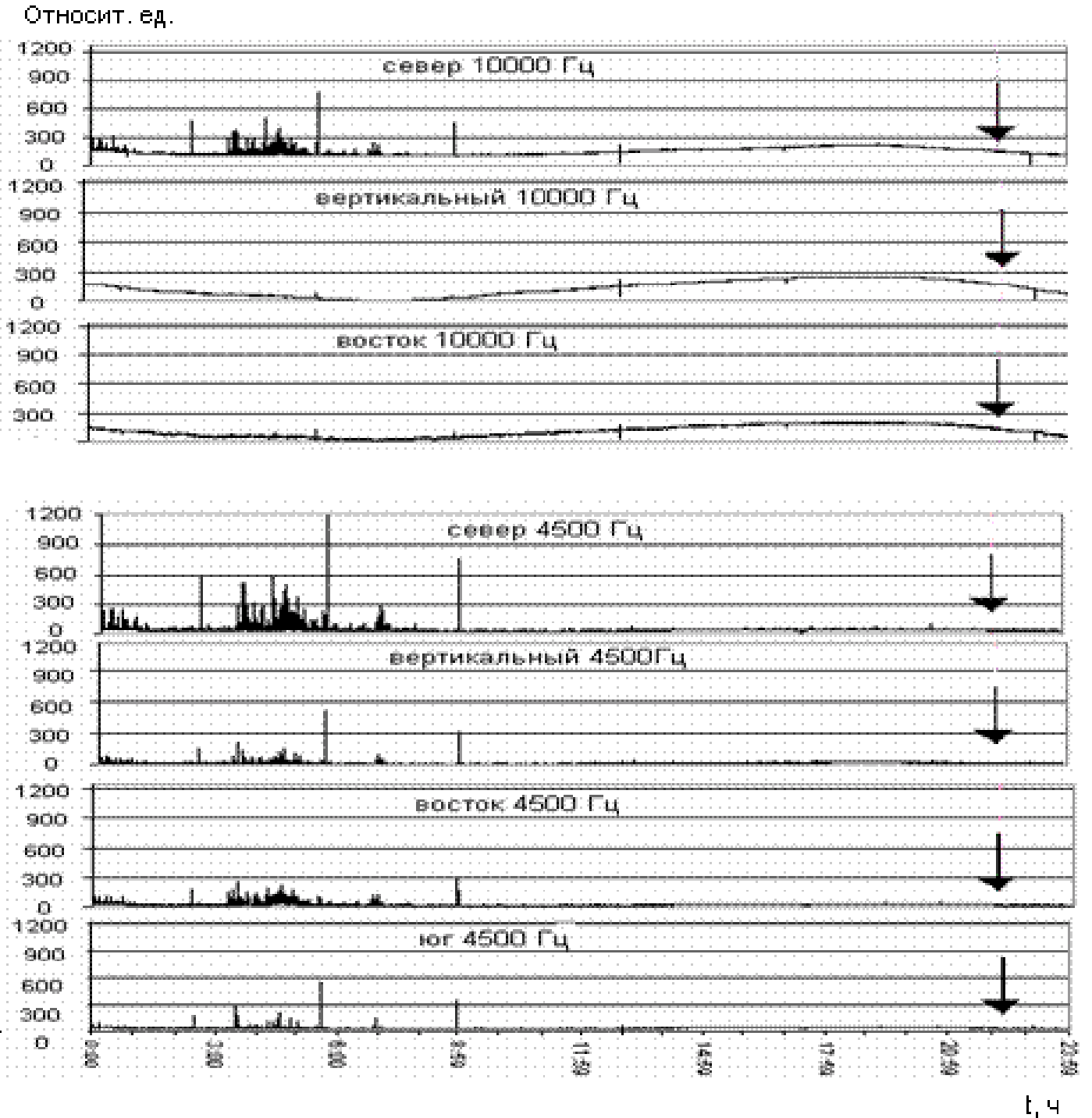


Рис. 8. Пример анизотропии геоакустических сигналов, полученных с разных направлений и предшествующих событию 12 мая 2002 (класс 11.1, расстояние от точки регистрации 205 км, глубина гипоцентра 26 км., азимут 63°), отмеченного на рисунке стрелкой.

баний, напоминающих скрип открывающейся двери, приведен на рис. 5. По всей видимости, наблюдалось образование кластера трещин.

Аномалии в акустических сигналах с превышением по амплитуде на порядок и более над фоновым уровнем возникают, как правило, в высокочастотной области 1...10 кГц, и лишь иногда они появляются

одновременно на более низких частотах. Этот эффект объясняется особенностями процесса трещинообразования (Чернышев, 1983). Эти шумы трудно с чем-либо спутать, настолько они интенсивные и специфичные. Они усиливаются за несколько часов до сильных сейсмических событий с энергетическим классом, как правило, 11 и больше. Такие события на

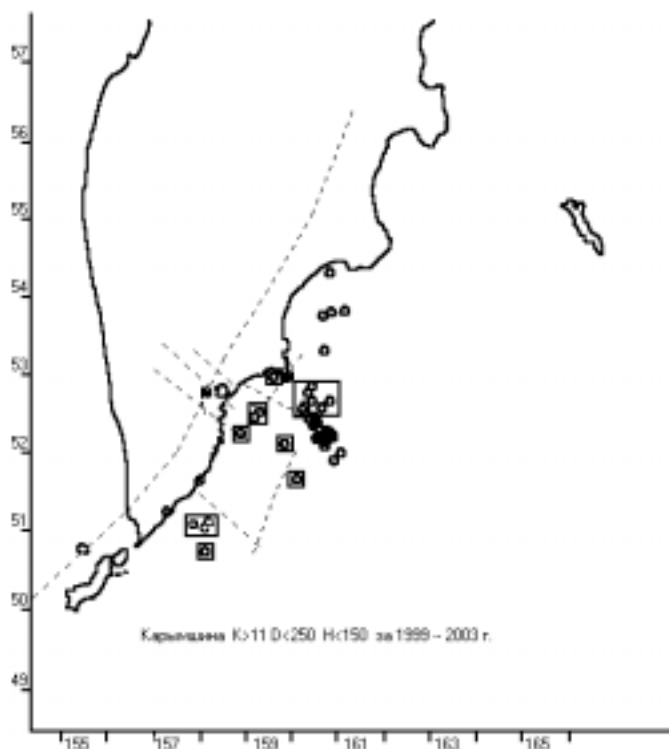


Рис. 9. Карта событий с 1999 по 2003 год (класс > 11, расстояние от пункта регистрации < 250 км, глубина до гипоцентра < 150 км.). Прямоугольниками отмечены события, зарегистрированные на р. Карымшина.

Камчатке происходят, примерно, раз в месяц и, примерно, в 70% случаев им предшествуют акустические аномалии (рис. 6, 7).

Слышимость аномалий в выбранных пунктах наблюдений зависит от энергии события, расстояния до гипоцентра и направления. В процессе наблюдений выявлено, что на сигнал, предшествующий событию, сильнее всего реагирует датчик, направленный на эпицентр готовящегося события (рис 8). За все время наблюдений было зарегистрировано более пятидесяти таких событий. Пространственное распределение их приведено на рис. 9–10. Видно, что около 70% контролируемой площади приходится на события, которые предварялись акустическими аномалиями. Это и объясняет процент слышимости аномалий. Наличие “мертвых зон” определяется, видимо, плохими условиями распространения сигналов в этих областях.

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность наблюдения высокочастотных геоакустических сигналов, возникающих за несколько часов до землетрясения и совпадающих по пеленгу с направлением на сейсмическое событие.

2. Построено пространственное распределение событий, сопровождаемых и не сопровождаемых аку-

стическими аномалиями, определены зоны и процент слышимости готовящихся землетрясений.

3. Показано, что при обнаружении акустических аномалий наиболее информативен килогерцовый диапазон, что объясняется особенностями трещинообразования. Аномальные сигналы выделяются характерной формой и продолжительностью вариаций интенсивности в спектральных полосах.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. и др. Подземный фоновый звук и его энергетическая модель как компоненты системы прогноза землетрясений. // Физика земли, 2002, № 12, с. 57-64.

Беляков А.С., Николаев А.В. Сейсмоакустические приемники с магнитоупругим преобразованием. // Физика Земли. 1993. №7. С. 74-80.

Горбатилов А.В., Хаякава М., Уеда С. и др. Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс // Вулканология и сейсмология. 2001. №4. С. 66 – 78.

Крылов В.В. Об излучении звука развивающимися трещинами. // Акустический журнал. Том XXIX Выпуск 6. 1983г С.790-798.

Купцов А.В., Богданова Т.А., Ларионов И.А., Шевцов Б.М., Шумилов Ю.С. Изменения характера акустической эмиссии Земли, соответствующей ранней стадии развития сейсмических событий. III Всероссийский симпозиум “Сейсмоакустика переходных зон”. Владивосток, 1-5 сентября, 2003 г., с. 108.

Лаппо С.С., Левин Б.В., Сассорова Е.В. и др. Гидроакустическая локация области зарождения океанического землетрясения. // ДАН, 2003, т. 388, № 6, с. 805-808.

Моргунов В.А., Любошевский М.Н., Фабрициус В.З., Фабрициус З.Э. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1991. №4 С.104 – 106.

Олещук В.Ю., Смирнов Г.Е. Исследования влияния сейсмической активности на шумы океана. Акустический институт им. Академика Андреева. Тихоокеанский филиал. 1991г. 222с.

Райс Дж. «Механика очага землетрясений».- М.: Мир, 1982. 217с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003, 270с.

Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240с.

Sassorova E.V., Levin B.W., Morozov V.E., Didenkulov I.N. Hydro-acoustic location of oceanic earthquake preparation region. // IUGG 2003, Sapporo, Japan, 2003, V. A, p. 192-193

Experimental Studies of Hydro-Acoustic Emission Anomalies, Corresponding to the Early Stage of Seismic Events Development

I. A. Larionov, B. M. Shevtsov, A. V. Kuptsov

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS

By means of two systems of directed hydrophones, placed in an artificial reservoir and in a lake, observations of hydro-acoustic emission in the frequency range 0.1...10000 Hz are carried out in Kamchatka. It is done for the purpose of investigation of emission characteristics and its changes, corresponding to the last stage of seismic event preparation. It was shown, that geo-acoustic noise is anisotropic, and its intensity increases in the direction of subduction zone, located 150...200 km from the observation point. At the background of noise, strong acoustic anomalies in kilohertz frequency range are registered with tens and hundreds times excess of the sound level. Opportunity of acoustic signals registration directly from the region of seismic event preparation was evaluated. During the four-year period of observations earthquakes with the energetic class more than 11 and with hypocentre, located not more than 200 km away from the registration point, were selected. From the sixty cases under consideration, thirty seismic events were preceded by 9-30-hour intensive high frequency hydro-acoustic anomalies, which had a special signal form and were easily detected. During other time intervals such acoustic anomalies were not observed. The zones of acoustic anomalies audibility were determined.