

На правах рукописи

Купцов Анатолий Владимирович

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ
СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность 01.04.06 – акустика

Купцов Анатолий Владимирович

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ
СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

Отпечатано в ОНТИ ТОИ ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

Подписано к печати 04.09.2006 г.
Заказ 76

Формат 60x84/16
Тираж 100 экз.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

с. Паратунка Елизовского района Камчатской области
2006 г.

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Шевцов Б. М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Буланов В. А.

доктор физико-математических наук,
профессор Короченцев В. И.

Ведущая организация: Институт вулканологии и сейсмологии
ДВО РАН

Защита состоится 6 октября 2006 года в 14 часов на заседании Диссертационного совета Д 005.017.01 при Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичева ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН и Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН.

Автореферат разослан 5 сентября 2006 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор технических наук

Коренбаум В. И.



ловск-Камчатский. Сб. научно-практической конференции «Проблемы сейсмичности Дальнего Востока». 1999. С. 153-155.

12. **Купцов А. В.**, Шумилов Ю. С. Исследование сейсмоакустических сигналов камчатских землетрясений. // Петропавловск-Камчатский. Сб. I международного совещания «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». 1998. С. 29-31.

13. **Kuptsov A. V.**, Shumilov Yu. S. Seismoacoustic signals of underwater earthquakes. // P-Kamchatsky. Int. Workshop “Local Tsunami Warning and Witigation”. 2002. P. 112-114.

Результаты работы представлены на 11 международных и всероссийских конференциях: I международное совещание “Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений”, П.-Камчатский, 1998; Научно-практическая конференция “Проблемы сейсмичности Дальнего Востока”, П.-Камчатский, 1999; II международное совещание “Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений”, П.-Камчатский, 2001; III Всероссийский симпозиум “Сейсмоакустика переходных зон”, Владивосток, 2003; Международный геотермальный научно-технический семинар, П.-Камчатский, 2004; III международная конференция “Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений”, с. Паратунка Камчатской обл., 2004; Ломоносовские чтения-2005, Москва, физфак МГУ, 2005; Международная конференция “Потоки и структуры в жидкостях” Москва, МГУ, 2005; Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM 2005), С.-Петербург, 2005; Международный научный симпозиум “Проблемные вопросы островной и прибрежной сейсмологии (ОПС-2005)”, Южно-Сахалинск, 2005; XVI сессия Российского акустического общества (14-18 ноября 2005).

2. **Купцов А. В.** Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке. // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59 – 65.
3. **Купцов А. В.**, Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45-59.
4. **Купцов А. В.**, Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке. // Электронный журнал "Исследовано в России", 262/041229, стр. 2809-2818 <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2004/262.pdf> (310302 bytes).
5. **Купцов А. В.**, Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Щербина А. О. Геоакустическая система мониторинга и прогнозирования сейсмической активности на полуострове Камчатка. // С.-Петербург. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). Сборник докладов 2005. Т. 2. С. 159-161.
6. Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., **Купцов А. В.**, Шевцов Б. М. Предвестники землетрясений и векторные звукоприемники у биообъектов. // М.: МАКС Пресс. Труды 4-й Всероссийской. Научн. конф. «Физические проблемы экологии». 2005. № 13. С. 125-138.
7. Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., **Купцов А. В.**, Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. Векторные звукоприемники как регистраторы предвестников землетрясений. // Москва. XVI сессия Российского акустического общества. Сб. трудов. 2005. Т. 1. С. 269 – 273.
8. **Купцов А. В.** Исследование сейсмоакустических сигналов камчатских землетрясений с использованием векторных гидроакустических приемников. // Петропавловск-Камчатский. Сб. II межд. совещ. «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». 2001. С. 60-61.
9. **Купцов А. В.**, Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Экспериментальные исследования аномалий геоакустической эмиссии, соответствующей ранней стадии развития сейсмических событий. // Петропавловск-Камчатский. Вестник КРАУНЦ, серия науки о Земле. 2004. № 3 С. 46-52.
10. **Купцов А. В.**, Ларионов И. А. Применение гидроакустических систем в исследованиях геоакустической эмиссии Земли. // Петропавловск-Камчатский. Сб. трудов КамчатГТУ. Выпуск 14. 2004. С 56-59.
11. **Купцов А. В.**, Петроченко С. П., Шумилов Ю. С. К вопросу о гидроакустических сигналах камчатских землетрясений. // Петропав-

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Настоящая работа посвящена исследованиям особенностей высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясений. Звук широко используется как средство наблюдений за поведением материалов, находящихся в напряженном состоянии. На основе этого подхода разработаны очень чувствительные методы контроля, позволяющие обнаруживать изменения в деформациях на уровнях значительно ниже предела прочности.

Источниками акустической эмиссии являются процессы разрушения материалов, движения по уже готовым трещинам или разломам, смещения по границам неоднородностей среды, подвижки среды в результате перестройки блочных структур и т. д.

Интенсивность акустической эмиссии сложным нелинейным образом зависит не только от уровня деформаций, но и от скорости их изменений. Анизотропия акустических сигналов связана с поляризацией смещений в поле сдвиговых деформаций. Процессы всестороннего сжатия оказывают меньшее влияние, поскольку прочность материалов по отношению к ним значительно выше.

Анизотропия акустических сигналов позволяет определить ориентацию сдвигов и направления на источники напряжений, а по интенсивности эмиссии можно судить о динамике деформационного процесса. Поэтому исследования свойств акустической эмиссии на различных стадиях подготовки землетрясений представляют значительный научный и практический интерес для разработки методов геоакустической локации областей повышенных напряжений и оценки сейсмической опасности.

Упругие колебания в геофизике принято рассматривать в четырех частотных диапазонах: сейсмическом (0.01-10 Гц), высокочастотном сейсмическом (10-100 Гц), сейсмоакустическом (100-1000 Гц) и акустическом (более 1 кГц). В каждом из них интенсивность сигналов определяется активностью движений на соответствующих масштабах среды и местными условиями. Из-за сильной частотной зависимости затухания сигналов существенно меняется в этих диапазонах размер пространственной области, ответственной за генерацию геоакустических шумов, а соответственно этому заметно отличаются и их характеристики. То же самое можно сказать и о механизмах генерации геоакустических предвестников. В связи с этим особое внимание в на-

стоящей работе уделяется сравнительному анализу сигналов в различных частотных диапазонах и пунктах наблюдений.

Низкочастотные сигналы могут приходиться с больших расстояний, в том числе и из областей, близких к эпицентру готовящегося землетрясения, в то время как высокочастотные геоакустические шумы формируются исключительно локально, но как те, так и другие обусловлены деформационными процессами, которые, как известно, активизируются на заключительной стадии подготовки землетрясений. Это и определяет появление акустических предвестников в интервале времен от дней до минут перед землетрясениями и используется в краткосрочном и оперативном прогнозах.

Напряжения и деформации в горных породах, возникающие в результате подготовки землетрясений, передаются на большие расстояния на весьма низком уровне, но при этом могут проявляться в высокочастотной акустической эмиссии, что и объясняет довольно парадоксальное на первый взгляд явление – появление акустических предвестников в килогерцовом диапазоне за сотни километров от эпицентров. Именно этому типу предвестников, как наименее изученному, уделяется особое внимание в настоящей работе.

Особенности генерации высокочастотной геоакустической эмиссии исследовались в лабораторных и натуральных условиях, в том числе и перед возникновением горных ударов в шахтах. Однако свойства высокочастотных геоакустических шумов в периоды подготовки землетрясений по-прежнему остаются мало изученными.

Акустическая эмиссия наблюдалась в скважинах, шахтах, тоннелях, на дне океана, при этом измерения выполнялись в отдельных частотных полосах с верхней границей около 1 кГц. Особенностью сейсмических процессов в районе полуострова Камчатка является то, что гипоцентры большинства землетрясений находятся под дном прибрежной зоны Тихого океана. Предполагалось, что в этих условиях контроль сейсмического режима возможен посредством придонных гидроакустических систем.

Проводимые с 1986 по 1991 г. эксперименты показали, что для регистрации и исследования сейсмических сигналов килогерцового диапазона гидроакустические системы благодаря своим техническим характеристикам достаточно эффективны, однако их применению в этих целях препятствуют помехи от прибора, судоходства и других источников акустических шумов океана.

В настоящей работе предложен достаточно простой в реализации и эффективный метод регистрации геоакустической эмиссии с помо-

направлений прихода сигналов и с помощью комбинированного приемника, но они не намного улучшили результат. Видимо, величина около двух десятков градусов определяется особенностями деформационного процесса. Этот интересный эффект требует дальнейших исследований.

Заключение

В результате многолетних наблюдений геоакустической эмиссии на Камчатке в диапазоне 0-10 кГц получены уникальные экспериментальные данные об ее изменениях, соответствующих заключительной стадии подготовки землетрясений. На основе представленных материалов можно сделать следующие выводы.

Основные результаты работы

- Выявлены высокочастотные (в диапазоне 1-10 кГц) аномалии геоакустической эмиссии, предшествующие землетрясениям примерно за сутки. Аномалии создаются под воздействием статических деформаций, возникающих в процессе подготовки землетрясений за сотни километров от эпицентров.
- В результате исследований анизотропии аномальных сигналов обнаружено совпадение их пеленга с направлением на эпицентр. Этот эффект обусловлен поляризацией источников эмиссии в поле сдвиговых деформаций.
- Получено пространственное распределение сейсмических событий по их степени влияния на генерацию геоакустической эмиссии. Данное явление связано с особенностями пространственного распределения сдвиговых напряжений.
- Показана эффективность наблюдений геоакустической эмиссии в небольших водоемах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 13 работ, 3 из них в центральных научных изданиях, 1 в электронном журнале, 2 в сборниках статей и 7 научных докладов в трудах конференций.

1. Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., **Купцов А. В.**, Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений. // Доклады академии наук, 2006, т. 407. С. 669 – 672.

ет, прежде всего, высокочастотный диапазон, рис. 6. Это связано с тем, что сигнал состоит из высокочастотных импульсов, рис. 3 и 5.

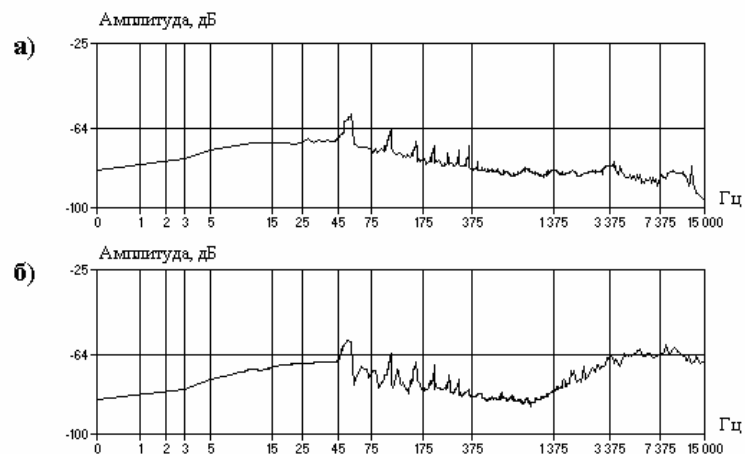


Рис. 6. Сравнение спектров геоакустического сигнала: а – в отсутствие деформационной активности, б – во время возмущения эмиссии перед землетрясением.

3.7. Направления распространения аномального сигнала

Деформации из очагов землетрясений создают в породах под водоемами сдвиговые напряжения, определяющие преимущественную ориентацию трещин (подвижек), которые в свою очередь за счет особенностей диаграммы направленности излучения формируют анизотропное распределение акустических шумов. Как было показано в п. 1.4, максимум этого распределения примерно совпадает с направлением на источник деформаций.

С помощью систем направленных гидрофонов по соотношению амплитуд их сигналов можно получить оценку пеленга с точностью около десяти градусов, в то время как комбинированный приемник и система «Шельф-03» позволяют сделать это с разрешением порядка нескольких градусов. Для анализа анизотропии излучения по всем направлениям в частотном диапазоне 3-7 кГц были отобраны 10 аномальных сигналов, предшествующих сейсмическим событиям. Разброс разностей между азимутами на эпицентры и пеленгами сигналов получился от 2 до 54 градусов, а среднее значение равнялось 27.8° , что вполне удовлетворительно для данного метода определения пеленга. В целях проверки полученного результата были выполнены измерения

щью широкополосных (0-10 кГц) векторных систем размещенных в небольших естественных и искусственных водоемах, в которых уровень внешних помех значительно ниже и легко контролируется. Данный подход позволил исследовать в широком диапазоне частот особенности генерации акустической эмиссии в поверхностных осадочных породах в периоды подготовки землетрясений, находящихся за сотни километров от пунктов наблюдений.

Среди особенностей геоакустических шумов, прежде всего, следует отметить повышение интенсивности высокочастотной эмиссии примерно за день-два до события и совпадение пеленга сигналов с направлением на эпицентр. Эти результаты получены впервые и проверены на более чем ста сильных землетрясениях. В работе рассмотрены причины этих явлений, позволяющих осуществлять локацию областей повышенных напряжений в периоды подготовки землетрясений. В связи с этим большое внимание уделено исследованию анизотропии сигналов с помощью векторно-фазовых методов.

При анализе наблюдений с целью выделения акустических предвестников на фоне регулярных шумов возникает достаточно сложная задача по распознаванию образов. Она решается в настоящей работе посредством идентификации внешней помехи с помощью контроля метеопараметров и использования широкополосных сигналов, происхождение которых легко определяется предварительным прослушиванием.

Цели и задачи работы

Разработка систем и методов регистрации геоакустической эмиссии и анализ ее высокочастотных аномалий, приуроченных к сильным сейсмическим событиям, для создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность исследований, определены цели и задачи работы.

Первая глава обзорная. В ней для анализа экспериментальных результатов, полученных в работе, рассмотрены известные модели подготовки землетрясений и особенности геодинамических процессов в сейсмически активный период, приведены полезные сведения о связи

параметров разрывов в среде с характеристиками излучаемых ими акустических волн.

Во второй главе приводится описание разработанного автором экспериментального комплекса, методов регистрации и пеленгации геоакустических сигналов, способов калибровки измерительных трактов. Обсуждаются влияние метеоусловий в каждом из пунктов наблюдений и характеристики водоемов, в которых размещены приемные системы.

Третья глава посвящена анализу данных. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью различных систем, рассмотрена классификация сигналов. Обсуждаются особенности геоакустической эмиссии. Рассмотрены возмущения сигналов и их анизотропия, соответствующие процессу подготовки землетрясений.

В заключении приведены основные результаты работы.

Научная новизна работы

Получены новые знания о свойствах геоакустической эмиссии в период подготовки землетрясений. Впервые было показано возникновение ее высокочастотных аномалий (в диапазоне 1-10 кГц) примерно за сутки до сейсмического события на больших расстояниях от очага, обнаружена связь пеленга сигналов с направлением на эпицентр и получено пространственное распределение сейсмических событий по их степени влияния на генерацию геоакустической эмиссии. Все эффекты обоснованы с учетом особенностей геодеформационного процесса, а достоверность экспериментальных данных подтверждается сравнением сигналов трех различных систем наблюдений.

Основные положения, выносимые на защиту

- Возникновение высокочастотных аномалий геоакустической эмиссии в период подготовки землетрясений.
- Результаты исследований анизотропии аномальных сигналов.
- Пространственное распределение сейсмических событий по их степени влияния на генерацию геоакустической эмиссии.

Практическая ценность работы

Исследования выполнены в соответствии с основными научными направлениями ИКИР ДВО РАН, по Программе Президиума РАН № 13, подпрограмма 1, проект ДВО РАН № 04-1-02-008, а также при поддержке грантов ДВО РАН № 04-1-02-008 и РФФИ № 03-05-65302.

образования трещин или подвижек под действием деформаций. Поэтому сигналы, принимаемые в каждом из пунктов наблюдения, наряду с общими свойствами имеют и особенности, определяемые местными условиями.

Сигналы, получаемые одновременно в двух пунктах наблюдений, пульсируют с различной частотой, которая, видимо, определяется локальными напряжениями и характеристиками пород. Пульсации заметно отличаются по форме и амплитуде, однако возмущения в целом неплохо совпадают по времени.

На р. Карымшина в сигналах активнее низкие частоты и наиболее ярко выражена пульсирующая составляющая. И то и другое указывает на наличие крупномасштабных структур в этом районе, в которых возникающие деформационные подвижки являются источниками низкочастотной акустической эмиссии.

Сравнительный анализ сигналов в двух пунктах наблюдений позволяет выявить не только местные механизмы генерации акустической эмиссии, но и осуществлять локацию областей повышенных напряжений в периоды подготовки землетрясений.

3.6. Характеристики широкополосных сигналов

В этом разделе рассмотрены результаты широкополосной, в диапазоне частот 0-10 кГц, регистрации сигналов. Данные, полученные с помощью такого метода записи, рис. 5, использовались для более детальных исследований свойств акустической эмиссии.

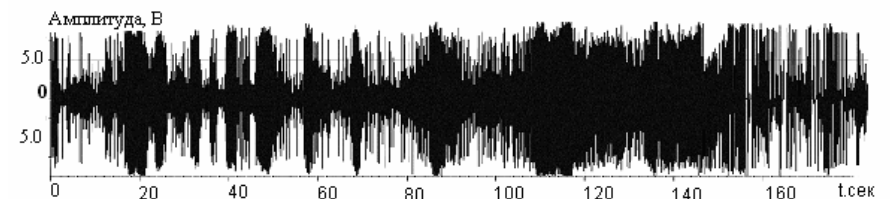


Рис. 5. Фрагмент широкополосной регистрации аномального сигнала на оз. Микижа перед событием 23.05.04, 03:06:29 по UT, 51.884° N, 158.81° E, D = 130 км, K = 10.6.

С пониманием механизма генерации акустической эмиссии становится очевидным, почему на деформационную активность реагиру-

возмущений сигнала: непрерывные (сильные), пульсирующие (средние) и слабые (на уровне фона и ниже).

Оказалось, что события с различными проявлениями группируются в отдельных областях и, как правило, не перемешиваются. Имеются зоны, из которых возмущения почти не передаются. Это можно объяснить особенностями формирования сдвиговых деформаций, см. п. 1.5. Отличие группировок событий для разных пунктов наблюдений объясняется тем, что они разнесены и находятся в различных условиях распространения деформаций.

Следует отметить, что за период геоакустических наблюдений было зарегистрировано **73** сейсмических события с $11 \leq K < 12$ и **65** с $K \geq 12$. Это меньше числа землетрясений по каталогу, что объясняется простотой регистрирующего оборудования.

После объединения близких по пространству и во времени сейсмических событий получилось **38** зарегистрированных сейсмических события с $11 \leq K < 12$ в измерительном пункте на р. Карымшина и **36** на оз. Микижа. Землетрясений с энергетическим классом $K \geq 12$ на р. Карымшина было зарегистрировано **40**, а на оз. Микижа – **22**.

Из **38** наблюдений на р. Карымшина для событий с $11 \leq K < 12$ **28** имели аномальное повышение уровня акустического сигнала в высокочастотной части спектра примерно за сутки до события, что составляет 74%. Из **36** наблюдений на оз. Микижа **28** имели геоакустический отклик (78%). В среднем получается 76%.

Из **40** сейсмических событий с $K \geq 12$ на р. Карымшина имели отклик на подготовку **38**, что составляет 95%, а из **22** на оз. Микижа имели отклик **18** событий (82%). В среднем – 88%.

Если учесть, что события, которые не дали возмущений, находятся в зонах, из которых возмущения почти не передаются, то это еще больше поднимет коэффициент корреляции. А зоны эти, видимо, можно все-таки контролировать с помощью дополнительных пунктов наблюдений.

3.5. Анализ сигнала в двух пунктах наблюдений

Во время синхронной работы обоих измерительных пунктов было зарегистрировано **32** землетрясения с энергетическим классом $K \geq 11$. Из них **24** раза одновременно наблюдался аномальный геоакустический сигнал.

В связи с сильным затуханием высокочастотные геоакустические сигналы не передаются на большие расстояния из очагов будущих землетрясений, а создаются вблизи пунктов наблюдений в результате

Новые знания о свойствах геоакустической эмиссии могут быть использованы в исследованиях тектонических процессов и взаимодействия геосфер, для создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности.

Личный вклад

Автор работы являлся инициатором постановки эксперимента по наблюдению геоакустической эмиссии при помощи гидроакустических систем в небольших водоемах. Им на основе системы направленных гидрофонов создан комплекс регистрации и первичной обработки сигналов, с помощью которого выполнены многолетние наблюдения. Полученные материалы легли в основу диссертации. Широкополосная система регистрации разработана Марапульцом Ю. В. Анализ результатов выполнен в соавторстве с сотрудниками лаборатории акустических исследований. Обоснование наблюдаемых эффектов предложено Шевцовым Б. М.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ИСТОЧНИКИ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

1.1. Модели подготовки землетрясений

Возникновение аномалий геоакустической эмиссии обусловлено деформациями пород в районе пунктов наблюдений. Для понимания связи деформаций с активизацией сейсмического процесса рассмотрены модели подготовки землетрясений: лавинно-неустойчивого трещинообразования, ударно-волновая, дилатантно-диффузионная и другие. При некоторых различиях в рассмотренных моделях, надо отметить, что они имеют и общие положения, связанные с активизацией деформационных процессов на заключительной стадии подготовки землетрясений и разуплотнением среды за счет образования трещин, излучающих упругие колебания. Важно, что деформации активизируются на расстояниях за сотни километров от эпицентров. Этот факт подтверждается с помощью GPS- наблюдений и объясняет появление высокочастотной акустической эмиссии при подготовке удаленных землетрясений.

1.2. Зоны дилатансии и акустической эмиссии

Дилатансия – это нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольшими каса-

тельными напряжениями порога прочности. Акустическая же эмиссия возникает при напряжениях значительно более низких, поэтому пространственные размеры зон эмиссии в несколько раз превышают масштабы областей дилатансии и могут достигать сотен километров.

Формируются зоны эмиссии, как и дилатансии, вследствие конкуренции касательных напряжений и литостатического давления, в результате чего пространственное распределение зон стремится к дневной поверхности.

Расчеты, выполненные с помощью решения Миндлина для однородного изотропного упругого полупространства в случае простой силы и с учетом критерия Шлейхера-Надаи, показывают наличие поверхностных зон, которые простираются значительно дальше, чем очаговые. За это ответственны литостатические эффекты и отсутствие напряжений на верхней границе полупространства.

Таким образом, нет ничего парадоксального в том, что аномальные акустические сигналы возникают за сотни километров от эпицентров на заключительной стадии подготовки землетрясений.

1.3. Характеристики сдвиговых источников

В этом разделе рассмотрены характеристики сдвиговых источников упругих колебаний (трещин, движений по уже готовым разломам, смещений по границам неоднородностей среды, проскальзываний при упруго-пластических деформациях, подвижек среды в результате перестройки блочных структур и т. д.). Сведения о направленности излучения сдвиговых источников необходимы при анализе анизотропии акустической эмиссии и для объяснения ее связи с деформациями, возникающими при подготовке землетрясений.

На основе элементарных представлений о движениях в разрывах показана анизотропия диаграммы направленности упругих колебаний сдвиговых источников.

1.4. Поляризация источников акустической эмиссии

В этом разделе рассмотрена ориентация сдвиговых источников при деформациях сжатия и сдвига. Показано, что в первом случае максимум акустического излучения перпендикулярен оси сжатия, а во втором пеленг сигналов указывает на источник напряжений. Этот важный вывод, сделанный на основе простейших представлений о механизмах излучения сдвиговым источником упругих волн, будет ис-

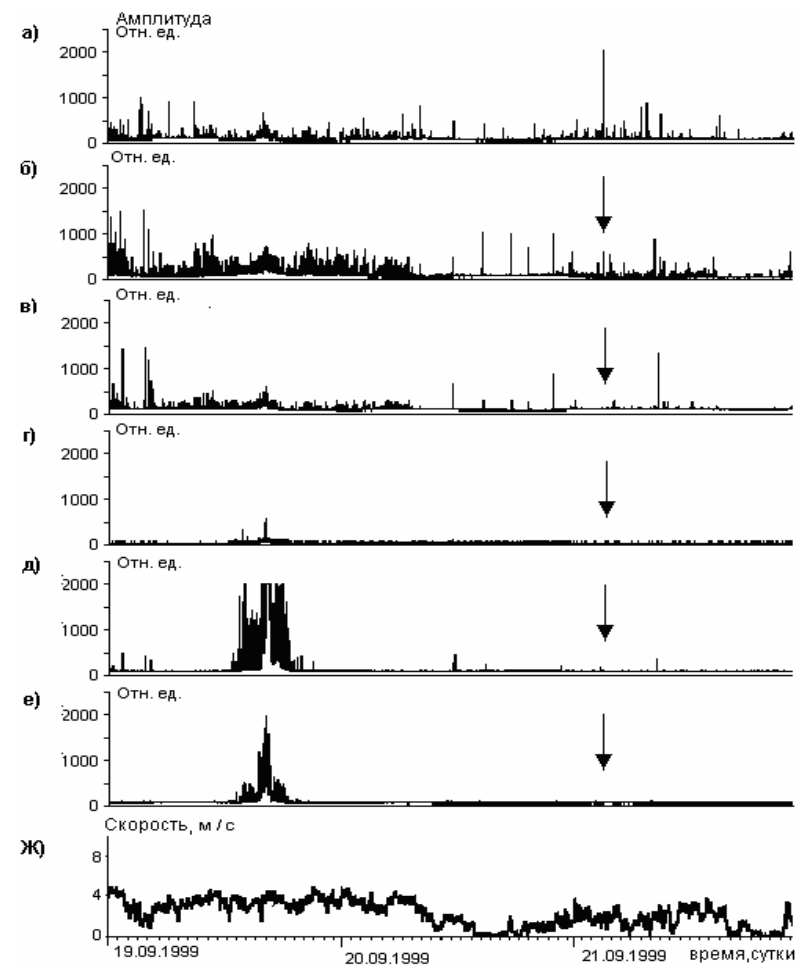


Рис. 4. Высоочастотные возмущения геоакустического сигнала в пункте наблюдений на р. Карымшина по вертикальному каналу перед событием 21.09.1999 г. с $K=11.5$, время события отмечено стрелкой. Диапазоны частот: а – ниже 10 Гц, б – 50-200 Гц, в – 200-700 Гц, г – 700-1500 Гц, д – 3000-7000 Гц, е – 7000-11500 Гц; ж – скорость ветра.

3.4. Пространственное распределение эпицентров

По данным геоакустических наблюдений были построены карты пространственного распределения эпицентров землетрясений с указанием их влияния на характер эмиссии, при этом рассматривались типы

сделать вывод, что характерные размеры источников геоакустической эмиссии в осадочных породах равны сантиметрам, а их кластеры могут достигать нескольких метров. В то время как амплитуды подвижек по данным деформационных измерений составляют доли микрон.

Рост интенсивности геоакустической эмиссии является реакцией на активизацию деформационных процессов. С повышением сейсмической активности в регионе растут деформации в пункте наблюдений, и в результате повышается частота следования импульсов геоакустической эмиссии.

3.2. Вариации и анизотропия шумов

Во всех диапазонах частот геоакустические шумы испытывают регулярные и случайные вариации. Заметный вклад в них дают гравитационные приливы, что особенно хорошо выражено на недельных и сезонных временных масштабах в виде смены квадратурных и сизигийных фаз. Однако на суточных периодах заметнее проявляются солнечные ритмы, не связанные с приливами. Максимум интенсивности высокочастотных геоакустических шумов приходится, примерно, на 8 часов местного времени, а минимум – на 20 вечера. Преобладает суточная составляющая. В спектре вариаций интенсивности высокочастотных геоакустических сигналов присутствуют также несоизмеримые с сутками периоды и комбинационные частоты, что указывает на нелинейный характер механизма генерации шумов.

На фоне регулярных вариаций акустических шумов во всех частотных диапазонах наблюдаются спорадические всплески интенсивности сигналов, которые обладают ярко выраженной анизотропией.

3.3. Аномалии в акустических сигналах

В данном разделе рассмотрены сильные возмущения интенсивности акустической эмиссии, приуроченные к процессам подготовки землетрясений. При анализе полученных данных было выявлено, что многим сейсмическим событиям предшествуют изменения в характере акустической эмиссии, которые выражаются в виде резкого и продолжительного повышения интенсивности шумов, рис. 4. При более детальном рассмотрении обнаруживалось, что повышение интенсивности есть ни что иное, как рост частоты следования высокочастотных геоакустических импульсов, это видно из сравнения рис. 3 и 5.

пользован при анализе экспериментальных данных в третьей главе для объяснения связи пеленга сигналов с направлением на эпицентр.

1.5. Пространственное распределение сдвиговых деформаций

Поскольку к сдвиговым напряжениям прочность пород значительно ниже, чем к напряжениям сжатия, то первые, разумеется, играют определяющую роль в формировании анизотропии акустических шумов.

За сдвиговые деформации отвечают три недиагональных элемента тензора напряжений, из которых в случае упругого полупространства у свободной границы отличен от нуля только один $\tau_{x,y}$, характеризующий напряжения в горизонтальной плоскости.

Расчеты для пространственного распределения компонент тензора деформаций на основе решения Миндлина для упругого полупространства при различных вариантах действующих сил показали, что приповерхностные зоны сдвиговых деформаций, которые по уровню 10^{-8} простираются на расстояния сотни километров от эпицентра, имеют квадрупольную структуру. В случае источника напряжений в виде простой силы недиагональный элемент тензора напряжений $\tau_{x,y}$ на свободной границе обращается в ноль на линии действия силы, которая предполагается горизонтальной, и принимает максимальные значения вдоль направления под 45° к ней.

При таком пространственном распределении поверхностных сдвиговых напряжений (в форме бабочки) акустические сигналы должны отсутствовать вблизи линии действия силы, а примерно под 45° к ней достигать максимума. Этот вывод позволяет понять причины пространственной группировки землетрясений по степени их влияния на эффективность генерации геоакустической эмиссии в пунктах наблюдений.

1.6. Источники геоакустической эмиссии

По данным GPS-наблюдений деформации земной поверхности составляют сантиметры в год, что соответствует десяткам микрометров в сутки, микрону в час и нанометру в секунду. Примерно такие средние скорости деформаций получаются при измерениях с помощью лазерного деформографа в пункте наблюдений на р. Карымшина.

Деформационные подвижки сопровождаются акустической эмиссией. Во время активизации деформационных процессов растут скорости деформаций и, соответственно, – интенсивность акустической

эмиссии. Деформации накапливаются примерно в течение месяца, что соответствует периоду сильных землетрясений на Камчатке, а затем могут изменить направление. Геометрические характеристики деформационных подвижек нетрудно оценить из параметров акустических сигналов, которые будут рассматриваться в главе 3.

ГЛАВА 2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Комплекс геоакустических наблюдений

Для регистрации геоакустических сигналов использовались две приемные системы, установленные в небольших водоемах. Каждая система состояла из четырех совмещенных направленных гидрофонов, ориентированных по сторонам света (кроме запада) и вниз, рис. 1. Западный сектор был исключен из наблюдений вследствие наименьшей изменчивости сигналов этого направления.



Рис. 1. Акустическая система из четырех направленных гидрофонов.

Конструкция из четырех разнонаправленных приемников позволяет достаточно эффективно оценивать анизотропию акустических шумов. Одна из таких систем размещена на дне укрытого бассейна размерами $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$ в пункте комплексных геофизических наблюдений на р. Карымшина (52.49° N , 158.09° E), а другая – на удалении 20-ти км к северу на дне оз. Микижа (52.60° N , 158.14° E), площадью $200 \times 700 \text{ м}^2$ и с наибольшей глубиной 4 м.

Система в первом пункте наблюдений находится в эксплуатации с июля 1999 г., а во втором – с ноября 2001 г.

По результатам сопоставления можно сделать вывод, что наблюдается идентичность акустических сигналов различных приемных систем, как по форме, так и по соотношению амплитуд в каналах.

Из свойств сигналов можно получить еще и некоторую информацию о характеристиках среды. Временная задержка между приходом продольных и поперечных колебаний составляет десятки миллисекунд при разнице их скоростей распространения около 1 км/с. Это говорит о том, что источники сигналов находятся на расстояниях десятки метров от точки приема. Это хорошо согласуется с величиной коэффициента затухания в осадочных породах 200 дБ/км.

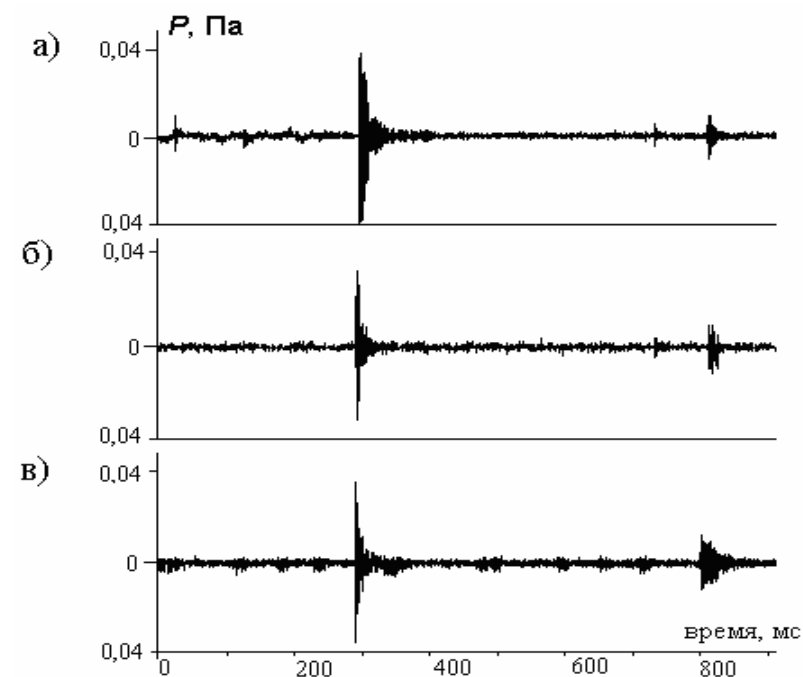


Рис. 3. Импульсы, полученные одновременно тремя системами: а) направленный гидрофон, б) векторный канал комбинированного приемника, в) один из гидрофонов системы “Шельф-03”.

По данным наблюдений частота заполнения геоакустических импульсов составляет килоггерцы, а их длительность миллисекунды. Скорость деформационных подвижек равна примерно скорости распространения поперечных колебаний, т. е. около 1 км/с. Из этого можно

На рис. 2, на примере сейсмического события 18.12.2002 г. с энергетическим классом $K=12.1$, произошедшего в районе полуострова Шипунский на расстоянии 120 км от пункта наблюдения, приведены сигналы, зарегистрированные акустической системой на оз. Микижа, кривые а и б, здесь же помещены сигналы гидроакустической системы в океане и сейсмографа.

Все сигналы имеют характерную форму вступления Р и S волн. Их хорошая сопоставимость говорит о том, что системы, размещенные в малых водоемах, вполне можно использовать для регистрации низкочастотных сейсмических сигналов.

Для сопоставлений сигналов в диапазоне частот больше 1 кГц летом 2004 г. на оз. Микижа была произведена установка векторно-фазового (комбинированного) приемника. Запись его данных по всем четырем каналам производилась широкополосной системой регистрации.

Для проверки достоверности получаемых данных и исследования пространственных характеристик источников сигналов в марте 2005 и 2006 гг. на оз. Микижа сроком примерно на месяц устанавливалась третья измерительная гидроакустическая система «Шельф-03» разработки ТОИ ДВО РАН. Ее антенна позволяла использовать метод триангуляции.

Таким образом, производилась одновременная регистрация геоакустических сигналов тремя различными измерительными системами, расположенными в непосредственной близости друг от друга, что позволило выполнить детальный сравнительный анализ полученных данных. Заметим, что из-за сильного затухания упругих колебаний килогерцового диапазона в осадочных породах расстояние между приемниками в десятки метров уже существенно сказывалось на результатах измерений.

На рис. 3 представлены высокочастотные геоакустические сигналы трех систем в период, когда деформационная активность отсутствует и частота следования звуковых импульсов не высокая, около одного импульса в секунду. При активизации деформационных процессов частота следования импульсов возрастает на порядки.

Из анализа представленных данных можно заключить, что геоакустическая эмиссия состоит из импульсов ударного типа, которые возникают обычно при образовании трещин или деформационных подвижек. При более детальном рассмотрении многие импульсы напоминают сигналы микроземлетрясений. С использованием сейсмологических методов можно оценить параметры подвижек.

2.2. Направленные гидрофоны

Приемники рассмотренных выше двух гидроакустических систем представляют собой пьезокерамические цилиндрические гидрофоны мембранного типа диаметром $D = 65$ мм, ширина диаграммы направленности которых оценивается, как $\theta = \lambda / D$, где λ – длина волны излучения. Коэффициент усиления предварительных усилителей 100.

2.3. Комбинированный приемник

В целях проверки данных, полученных с помощью систем наблюдений, рассмотренных выше, для регистрации сигналов с лета 2004 г. на оз. Микижа был установлен комбинированный акустический приемник разработки кафедры акустики МГУ и НИИФТРИ, производства ЗАО «Геоакустика». Приемник объединяет в себе сферический пьезокерамический преобразователь давления и трехкомпонентный пьезокерамический инерционный соколябательного типа диаметром 50 мм датчик градиента давления.

Комбинированный приемник имеет диапазон частот 10-10000 Гц, чувствительность какала давления (без учета предусилителей) составляет $5 \text{ мВ} \cdot \text{Па}^{-1}$, а векторных каналов, которые ортогональны и образуют правую тройку, – $2 \text{ мВ} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{кГц}^{-1}$. Направление прихода сигнала и вектора плотности мощности определяется по соотношению фаз сигналов между каналами.

2.4. Система разнесенных гидрофонов

Для повышения достоверности наблюдений и исследований пространственных характеристик источников геоакустической эмиссии по методу триангуляции использовалась автономная трехканальная акустическая станция «Шельф-03», разработанная в ТОИ ДВО РАН. Станция обеспечивает непрерывную запись акустических сигналов в полосе частот 1-15000 Гц с динамическим диапазоном не менее 96 дБ. В качестве преобразователя акустического давления применяются калиброванные сферические гидрофоны, снабженные встроенными предварительными усилителями. Чувствительность по всему частотному диапазону составляет 50 мВ/Па.

2.5. Комплекс регистрации и обработки сигналов

Для регистрации, обработки и накопления сигналов с направленных гидрофонов и комбинированного приемника были созданы две

аналогово-цифровые системы, которые с помощью радио коммуникационных линий интегрировались в вычислительно-информационную сеть института.

Первая система позволяла осуществлять непрерывный мониторинг геоакустической эмиссии в семи частотных диапазонах со временем накопления (усреднения) 4 сек, а вторая регистрировала широкополосные сигналы в диапазоне 0-10 кГц для детального изучения их аномалии. Накопители обеспечивали сохранность полной информации в течение примерно недели. Такими системами были оборудованы оба наблюдательных пункта.

2.6. Характеристики водоемов и пунктов наблюдений

В обоих пунктах наблюдений измерительные системы установлены на верхней границе слоя осадочных пород, мощность которых равняется примерно 100 м, средняя скорость продольных колебаний 2,8 км/с, а скорость поперечных волн 1,6 км/с. Измерения в районе работ коэффициента поглощения звука в килгерцовом диапазоне дали величину около 200 дБ/км. Это говорит о том, что сигналы геоакустической эмиссии на высоких частотах формируются на расстояниях от приемников не более чем 100 м.

Осадочные породы обладают низкой прочностью и повышенной пластичностью, это объясняет высокую эффективность генерации в них акустической эмиссии при слабых деформациях. Источниками сигналов являются деформационные подвижки.

Используемые небольшие водоемы имеют низкий уровень собственных шумов, которые создаются в основном атмосферными воздействиями и движениями грунтовых вод. На р. Карымшина искусственный водоем укрыт сверху и защищен от атмосферных помех, поэтому в нем меньше сказываются влияния ветра и осадков. Снежные покровы в зимнее время на обоих пунктах наблюдений хорошо демпфируют как естественные, так и техногенные шумы. В начале зимы заметно проявляются помехи, связанные с промерзанием почвы и становлением льда на озере.

Водоемы обладают собственными резонансами, которые легко оцениваются по глубине бассейнов и иногда наблюдаются, но в целом существенного влияния не оказывают.

2.7. Влияние метеоусловий

Воздействие метеоусловий на частотные каналы в двух пунктах наблюдений подробно исследовалось. Заметное влияние ветра имеет место в диапазоне 0-0.7 кГц, а дождя – в полосе 0-1.5 кГц, в то время как геоакустические сигналы, сопровождающие подготовку землетрясений, возникают на более высоких частотах.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Сравнение сигналов различных систем

Анализ достоверности полученных данных был выполнен в первую очередь путем сравнения сигналов, полученных с помощью трех акустических приемников, характеристики которых были рассмотрены во второй главе. Кроме этого, привлекались сейсмоданные, сопоставимые с низкочастотной составляющей сигналов акустических систем. И, наконец, были использованы результаты океанских гидроакустических наблюдений.

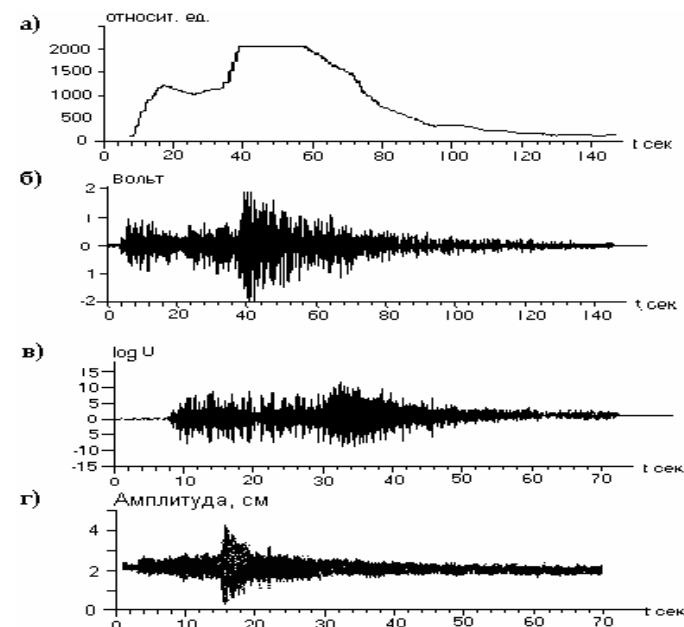


Рис. 2. Сигнал сейсмического события: детектированный (а) и широкополосный в озере (б), в океане (в) и сейсмографа (г).