



На правах рукописи

Ларионов Игорь Александрович

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ДЕФОРМАЦИЙ  
ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Специальность 01.04.06 – акустика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

с. Паратунка Елизовского района Камчатского края  
2008 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,  
Стаценко Л.Г.

Ведущая организация: Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН

Защита состоится 25 сентября 2008 года в 16 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 22 августа 2008 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
доктор технических наук

Коренбаум В. И.



## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Настоящая работа посвящена исследованиям свойств и механизмов генерации высокочастотной геоакустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах в условия активизации деформационных процессов. Геоакустическая эмиссия природных сред возникает, как правило, в виде отклика на деформационные изменения, однако их эффективность, зависящая от различных факторов, должна определяться для конкретных условий, что, несомненно, представляет интерес для решения многих прикладных задач геофизики.

Например, сильные возмущения геоакустической эмиссии, возникающие в сейсмоактивных зонах, могут рассматриваться в качестве индикаторов деформационных изменений и предвестников землетрясений, но только после установления их связи с характеристиками деформационного процесса.

Исследования в этом направлении широко проводились с использованием одновременных акустических и деформационных наблюдений в скважинах и шахтах на глубинах, достаточных для исключения влияния атмосферных и техногенных факторов. В то же время для приповерхностных осадочных пород такие работы практически отсутствовали, поскольку считалось, что для них нельзя получить надежных результатов, как в связи с высоким уровнем помех, так и с нестабильностью их реологических свойств из-за сильного влияния внешних условий.

Актуальность изучения деформаций осадочных пород обусловлена их важной ролью во многих геофизических процессах, которые рассматриваются в сейсмологии, океанологии, горном деле и т.д. Широкий круг природных явлений в осадочных породах связан с их малой прочностью и высокой пластичностью, которые существенно зависят от внешних факторов. Благодаря этим свойствам даже низкие напряжения в таких средах вызывают появление хорошо регистрируемых акустических сигналов, что и было обнаружено в ряде работ по исследованию геоакустических предвестников землетрясений, но как они связаны с характеристиками деформационного процесса, этот вопрос оставался открытым. Так же необходимо было выяснить, каковы масштабы этого процесса, и возможна ли связь деформационных изменений в пунктах наблюдений с источниками напряжений в областях, которые удалены на сотни километров.

Осадочные породы по эмиссионным свойствам противоположны коренным. В твердых кристаллических материалах акустические эффекты начинают заметно проявляться в области больших напряжений при достижении пределов текучести и прочности, а в осадочных породах даже при незначительных нагрузках возникает акустическая эмиссия. В средах с такими свойствами создаются благоприятные условия для проявления даже слабых деформационных изменений, поэтому они перспективны для размещения в них систем обнаружения и исследования предвестников землетрясений, проявление которых и обусловлено специфическими свойствами осадочных пород.

Приповерхностные системы наблюдений позволяют достаточно эффективно и без особых затрат получать данные для изучения геодформаций с помощью акустических сигналов, что также стимулировало интерес к изучению свойств неглубоко залегающих осадочных пород. Но наряду с этим необходимы были исследования характеристик самих геоакустических сигналов в таких средах, поскольку до настоящего времени не было работ, посвященных анализу геоакустической эмиссии осадочных пород в широком диапазоне частот от 0 до 10 кГц и при хорошо контролируемых деформационных изменениях.

Геоакустическая эмиссия сопровождает многие геофизические процессы, например, фильтрацию грунтовых вод, диффузию газов, электрокинетические эффекты, генерацию электрических полей и т. д., поэтому результаты ее исследований будут полезны для специалистов очень широкого круга. В последнее время большое внимание уделяется роли акустических колебаний в процессах взаимодействия геосфер в условия повышения различных видов природной активности. Несомненно, что геоакустическая эмиссия, возникающая в результате литосферных деформаций, занимает очень важное место в системе этих взаимодействий.

Для решения задач по исследованию свойств и эффективности генерации высокочастотной геоакустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах в условия активизации деформационных процессов использовался комплекс наблюдений, в который входили четыре системы регистрации геоакустических сигналов, лазерный деформограф, средства контроля метеопараметров, а также коммуникационная система сбора и передачи данных. Этот комплекс в сочетании с системами наблюдений за изменениями активности в атмосфере и ближнем космосе позволяют решать широкий круг задач по исследованию процессов взаимодействия геосфер.

## **Цели и задачи работы**

Исследование особенностей широкополосной геоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород и её связи с деформационными процессами.

Создание комплекса наблюдений, включающего системы регистрации акустических сигналов, лазерный деформограф, средства контроля метеопараметров, а также коммуникационную систему сбора и передачи данных.

## **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 рассматриваются различные теории генерации и распространения акустических волн в осадочных породах.

Во второй главе дано описание характеристик систем регистрации и методики наблюдений, рассмотрена зависимость полученных данных от метеоусловий.

В третьей главе обсуждаются результаты наблюдений, анализируются статистические характеристики сигналов, формы импульсов и их спектры, рассмотрен вопрос анизотропии геоакустической эмиссии, исследуется связь акустической эмиссии с деформациями пород.

В заключении приведены основные результаты работы.

## **Научная новизна работы**

Впервые были выполнены одновременные акустические и деформационные измерения в осадочных породах, для проведения этих работ был создан уникальный комплекс деформационных и акустических наблюдений с автоматизированной системой сбора и обработки данных. Впервые были выполнены исследования геоакустических сигналов в спокойные периоды и на этапах подготовки сейсмических событий, а также во время самих землетрясений. Показана связь интенсивности акустической эмиссии со скоростью деформаций. Исследована эффективность генерации акустических сигналов в осадочных породах в условиях деформационных изменений. Определены авто и кросскорреляционные функции акустических сигналов и показаний деформографа, которые позволяют делать выводы о волновом характере деформационных процессов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Акустические сигналы имеют импульсную форму и свойства фликер-шумов, которые подчиняются степенному амплитудно-частотному распределению, аналогичному закону повторяемости землетрясений Гуттенберга-Рихтера.
2. Увеличение интенсивности высокочастотной геоакустической эмиссии осадочных пород является следствием роста скорости деформационных процессов.
3. Пространственные и временные корреляции звуковых сигналов и показаний интерферометра указывают на волновой характер деформационных процессов.
4. Интенсивные деформационно-акустические возмущения возникают, как правило, в периоды подготовки сейсмических событий и могут рассматриваться в качестве комплексных предвестников землетрясений.

### **Практическая ценность работы**

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований ИКИР ДВО РАН, в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, проектов Президиума ДВО РАН № 05-1-0-02-051 и № 06-1-П16-070.

Результаты исследования свойств геоакустической эмиссии и ее связи с деформационными процессами могут быть использованы в изучении тектонических процессов, для создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности, в разработке акустических методов дистанционного зондирования природных сред.

### **Личный вклад**

Автор работы осуществлял регулярные наблюдения, сбор и обработку полученных данных, выполнил анализ акустических сигналов и исследовал их особенности, участвовал в теоретическом обосновании наблюдаемых эффектов. Собранные им экспериментальные и теоретические материалы составили основу диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы актуальность работы, ее цели и задачи, научная новизна, практическая ценность работы, личный вклад автора.

**В первой главе** «Акустика осадочных пород» рассмотрена теория распространения акустических волн в пористых флюидонасыщенных осадочных породах. **В разделе 1.1** приведены общие соотношения для плоских волн в изотропных и анизотропных средах, показаны зависимости напряжений от деформаций. **В разделах 1.2 и 1.3** изложено развитие теоретических представлений в акустике пористых флюидонасыщенных пород. **Раздел 1.2** посвящен теории Гассмана, основанной на предположении о том, что относительные движения твердых и жидких компонент осадочных пород имеют пренебрежимо малое влияние на распространение акустических волн. Это условие выполняется для низких частот, для которых эффекты вязкости можно не учитывать. **В разделе 1.3** рассматривается теория Био, которая возникла при изучении поведения электрического потенциала во влажных почвах и звукопоглощающих материалах, и которая описывает особенности распространения и затухания высокочастотных акустических волн в пористых флюидонасыщенных породах. Диапазону высоких частот в рассматриваемых средах соответствуют килогерцовые колебания, у которых влияние затухания сказывается настолько, что им нельзя пренебречь. Этому диапазону частот уделяется особое внимание в данной работе.

Важным результатом первой главы, который используется в дальнейшем при анализе экспериментальных данных, является вывод о наличии в области высоких частот волн 1 и 2-го рода для продольной поляризации, отличие которых заключается в синфазности и противофазности колебаний твердых и жидких фракций среды, что приводит к расщеплению дисперсионных соотношений. В результате этого волны 1 и 2-го рода отличаются по скорости, затуханию и дисперсионным искажениям. Из-за невозможности распространения поперечных колебаний в жидкой среде такое расщепление волн в теории Био не рассматривается.

В данной работе рассматриваются только продольные колебания, поскольку регистрация геоакустической эмиссии осуществлялась с помощью гидрофонов на дне водоемов. Отмеченная выше специфика излучения, связанная с наличием волн 1 и 2-го рода, разумеется, затрудняла анализ геоакустических сигналов и реализацию метода три-

ангуляции. А зависимость свойств осадочных пород от влагосодержания приводила к существенной изменчивости характеристик наблюдаемых импульсов. В связи с этим была предпринята попытка систематизации их многообразия с помощью создания каталога наиболее повторяемых форм импульсных сигналов.

**Вторая глава** посвящена описанию используемых систем регистрации геоакустической эмиссии и деформационных процессов.

**В разделе 2.1** описываются две приемные системы направленных гидрофонов, установленных в небольших водоемах искусственного и естественного происхождения. Каждая система состояла из совмещенных приемников, ориентированных по сторонам света и вниз. Их средняя чувствительность с предусилителями в килогерцовом диапазоне частот составляла сотни мВ/Па.

Для анализа сейсмической обстановки использовались данные Камчатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН.

**В разделе 2.2** рассматривается система регистрации акустических сигналов с помощью комбинированного приемника, который состоит из трехкомпонентного датчика колебательной скорости и измерителя звукового давления. Особенностью этой приемной системы, введенной в эксплуатацию на оз. Микижа в 2004 г., является возможность определения пеленга сигнала.

**В разделе 2.3** описываются акустические комплексы с разнесенными приемниками давления, которые использовались для повышения достоверности наблюдений и исследования пространственных характеристик источников геоакустической эмиссии по методу триангуляции. Первый из них – автономная трехканальная акустическая станция «Шельф-03», разработанная в ТОИ ДВО РАН для мониторинга акустических шумов океана. Ее чувствительность по всему частотному диапазону составляла 50 мВ/Па. Аналог такой станции в четырехканальном варианте на основе гидрофонов 1П2М разработан в ИКИР ДВО РАН.

**В разделе 2.4** рассматривается система регистрации деформационных процессов с помощью лазерного интерферометра Майкельсона, который установлен на расстоянии 70 м от акустической системы направленных гидрофонов в пункте комплексных геофизических наблюдений на р. Карымшина. Для исследования пространственных особенностей проявления акустических эффектов и измерения звуковых сигналов в непосредственной близости от деформографа, на одну из его опор был установлен дополнительный акустический датчик. Ин-



терферометр смонтирован на обсадных трубах двух скважин. Деформограф разработан в ТОИ ДВО РАН. Его измерительное плечо длиной 18 м ориентировано на юго-восток, перпендикулярно разлому в Камчатской зоне субдукции. Частота отсчетов его системы регистрации – 800 Гц, а чувствительность деформографа –  $10^{-8}$ .

Акустические комплексы и деформограф находятся в единой информационно-вычислительной сети института, а синхронизация по времени осуществлялась с помощью GPS-радиосигналов.

**Третья глава** «Характеристики сигналов» содержит описание особенностей высокочастотной геоакустической эмиссии осадочных пород и анализ ее поведения в спокойные периоды, во время роста деформационной активности и в моменты прихода сейсмических сигналов.

**В разделе 3.1** рассматриваются характеристики высокочастотной геоакустической эмиссии. При анализе акустического сигнала обнаруживается достаточно простая его структура, представляющая собой череду случайных импульсов релаксационной формы с частотой заполнения нескольких кГц и длительностью около 1мс. Пример акустических колебаний, напоминающих скрип открываемой двери, приведен на рис. 1. Возможно, это проявление образования кластера трещин или последовательности деформационных подвижек.

При наблюдаемом времени затухания сигнала около 0,02 с и примерной скорости 1,5 км/с колебаний в осадочных породах длина ослабления сигнала на частоте заполнения импульса 3 кГц получается 30 м. Коэффициент ослабления при этом будет 193 дБ/км, что характерно для осадочных пород.

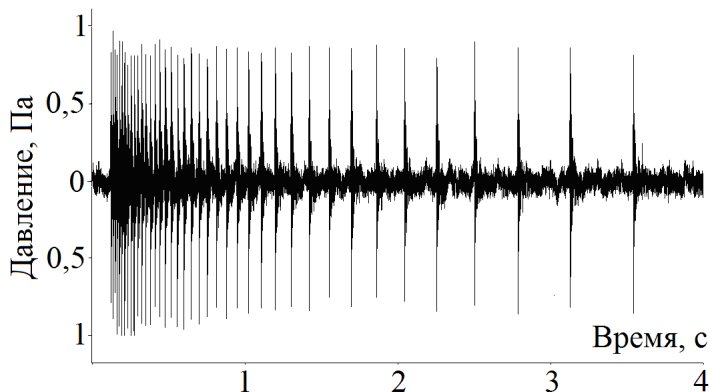


Рис. 1. Пример акустических колебаний

Частота заполнения наблюдаемых импульсов соответствует трещинам или деформационным подвижкам размером порядка метра, что определяется скоростью поперечных акустических волн. Размер трещин дает и амплитуду, и частоту заполнения сигналов, что приводит к зависимости между этими параметрами, в результате возникает подобие импульсов.

Диаграмма частоты следования импульсов в зависимости от их амплитуды, рис. 2, аналогична закону повторяемости землетрясений Гуттенберга-Рихтера. На врезке тот же график показан в двойном логарифмическом масштабе, а прямой изображен средний наклон зависимости, который, однако, носит условный характер, поскольку амплитуда сигнала дана в относительных единицах. Распределение импульсов на рис. 2 указывает на то, что наблюдается обычный процесс трещинообразования или подвижек по границам неоднородностей, а акустический сигнал имеет свойства характерные для фликер-шума, хорошо известного в радио и геофизике.

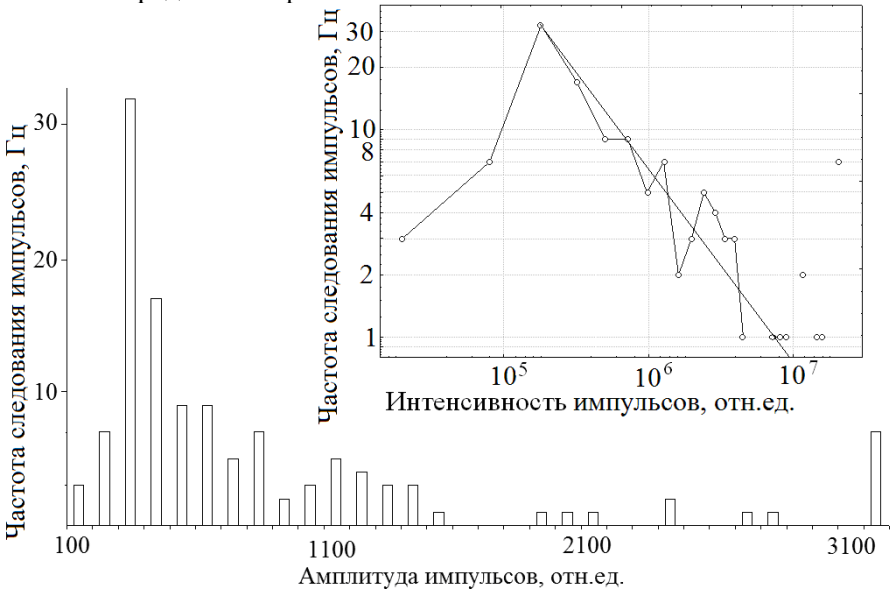


Рис. 2. Частота следования импульсов в зависимости от их амплитуды. На врезке те же данные, в двойном логарифмическом масштабе.

Сильная зависимость затухания сигналов от частоты проявляется в дисперсионных эффектах, которые играют важную роль в

формировании разнообразия подземных звуков. Один и тот же импульс трансформируется дисперсией настолько, что он слышится как высокочастотный скрип, звонкий щелчок, глухой стук или слабый шорох в зависимости от того, с каких расстояний он приходит. Дисперсионные искажения сигналов позволяют также эффективно оценивать расстояния до их источников. Импульсы от далеких источников теряют высокие частоты и существенно меняются по форме.

На оз. Микижа производилась одновременная регистрация геоакустических сигналов тремя различными измерительными системами, расположенными в непосредственной близости друг от друга, что позволило выполнить детальный сравнительный анализ полученных данных. Из-за сильного затухания упругих колебаний килогерцового диапазона в осадочных породах расстояние между приемниками в десятки метров уже существенно сказывалось на результатах измерений. Это показали данные наблюдений с помощью системы “Шельф-03”, приемники которой были разнесены на расстояние 70 м.

Из анализа полученных данных можно заключить, что геоакустическая эмиссия состоит из импульсов ударного типа, которые возникают обычно при образовании трещин или деформационных подвижек. Некоторые отличия в форме сигналов, можно объяснить их разными путями прихода, в результате чего по-разному сказываются затухания и дисперсионные искажения в среде распространения.

В спокойных условиях геоакустические импульсы имеют небольшую частоту следования, единицы или даже доли единиц в секунду. Однако в преддверии сильных сейсмических событий на расстояниях до 200 км от их эпицентров в геоакустической эмиссии в течение 6-12 часов возникают, как правило, сильные возмущения, характеризующиеся увеличением на 2-3 порядка частоты следования импульсов, которые, сливаясь, могут переходить в интенсивный непрерывный белый шум.

**В разделе 3.2** рассматривается геоакустическая эмиссия в условиях деформационной активности, которая возникает в периоды подготовки сейсмических событий.

Повышение интенсивности высокочастотной геоакустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах обусловлено ростом локальных напряжений. Для исследования особенностей акустических эффектов были выполнены непосредственные измерения деформаций земной поверхности одновременно с геоакустическими наблюдениями в периоды активизации деформационного процесса.

Изменения деформационной активности проявляются в вариациях скорости деформаций. Дифференцирование зависимости деформаций от времени позволяет исключить медленные тренды, возникающие вследствие сбоев системы регистрации и влияния метеоусловий. Наблюдения показали, что эффективность генерации геоакустической эмиссии зависит от частоты и интенсивности деформационных подвижек в горных породах.

Для исследования связи геоакустической эмиссии с особенностями деформационного процесса приемник акустических сигналов был установлен на одну из опор деформографа, в то время как основная система регистрации находилась на расстоянии 70 м. Это позволило выявить пространственно-временные особенности распространения деформаций и их проявлений в акустической эмиссии.

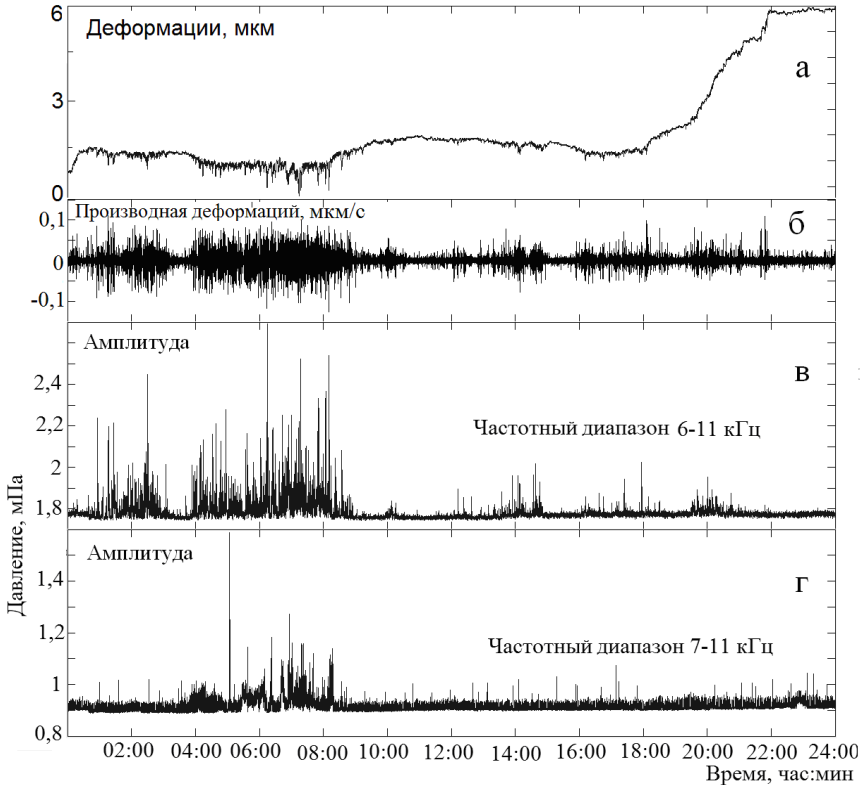


Рис. 3. Показания лазерного деформографа 1 мая 2007 г. (а), скорость деформаций (б), акустический сигнал датчика на опоре деформографа (в), акустический сигнал на удалении 70 м (г), время по Гринвичу.

Результат синхронных измерений, демонстрирующих одновременные деформационно-акустические возмущения, показан на рис. 3. Эти возмущения возникли за 25 часов до землетрясения, которое произошло на удалении примерно 200 км в восточном направлении.

Измерения с помощью направленных гидрофонов показали, что акустическая эмиссия во время возмущений имела ярко выраженную анизотропию с максимумом в северо-восточном направлении.

**В разделе 3.3** рассматриваются корреляции геоакустической эмиссии с деформационными процессами в осадочных породах.

По данным, приведенным на рис. 3 в интервале времен 0-12 часов, где быстрые изменения деформаций производят более сильный акустический эффект, были выполнены расчеты нормированных корреляционных функций сигналов акустических приемников, удаленных и совмещенных, с показаниями деформографа. Результаты вычислений показаны на рис. 4.

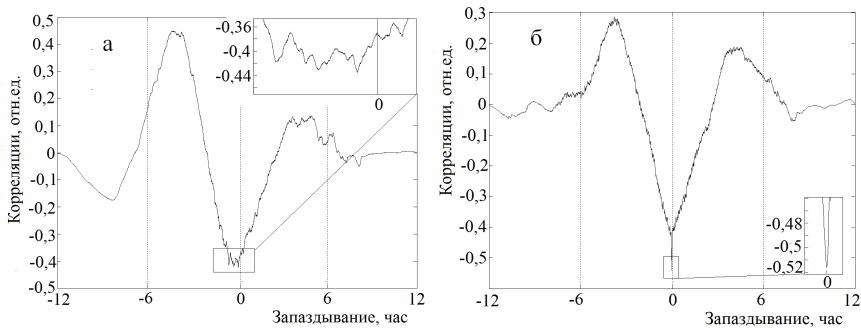


Рис. 4. Нормированные корреляционные функции сигналов удаленного акустического датчика (а) и совмещенного приемника (б) с показаниями деформографа.

Взаимные корреляционные функции имеют временной масштаб около 4 часов, видимо, связанный с характерным временем деформационно-акустических возмущений, см. рис. 3. На рис. 4а виден отрицательный временной сдвиг около 13 мин, который говорит о том, что деформации приходили примерно с севера-востока, что хорошо согласуется с данными системы направленных акустических приемников.

По временному сдвигу 13 мин между сигналами акустического приемника и деформографа и расстоянию 70 м между точками наблюдений можно найти скорость деформационных возмущений, которая

получается около 0.1 м/с (8.64 км/сут). Это скорость так называемых медленных деформационных волн. Они еще известны как торсионные или тектонические.

Волны такого типа связывают со скручиванием и переупаковкой в породах, что, возможно, объясняет необычные однополярные колебания в деформациях на рис. 3а.

На рис. 4б временного сдвига нет и виден еще узкий пик в нуле, указывающий на повышенные корреляции быстрых деформационных колебаний и всплесков геоакустической эмиссии.

Для оценки корреляций геоакустического сигнала и модуля скорости деформаций использовался весь ряд данных на рис. 3. Графики взаимных корреляционных функций показаны на рис. 5. Величина задержки акустического сигнала удаленного приемника относительно скорости деформационного процесса составила 18.5 мин, рис. 5а. Это небольшое изменение по сравнению с предыдущим случаем, рис. 4а, если учесть, что длина обрабатываемого ряда увеличилась вдвое.

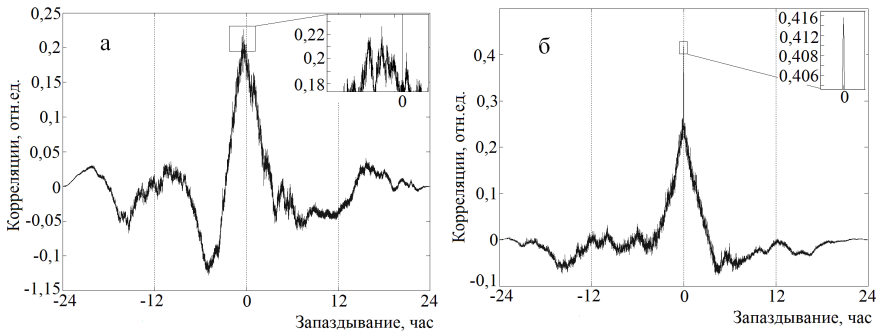


Рис. 5. Нормированные корреляционные функции сигналов удаленного акустического датчика (а) и совмещенного приемника (б) со скоростью деформаций.

На рис. 5а, как и на рис. 4а, виден узкий пик, характерный для акустического приемника, совмещенного с деформографом. Спад корреляций по мере удаления акустического приемника от деформографа позволяет оценить длину затухания акустических сигналов – первые десятки метров, что хорошо согласуется с выводами, полученными из анализа характеристик сигналов.

Наряду с результатами, представленными на рис. 4 и 5, найдены кросскорреляционные функции сигналов акустических датчиков,

удаленного и совмещенного. Зависимости, разумеется, повторяют в целом кривые 4а и 5а. Автокорреляционные функции всех трех сигналов имеют одинаковые часовые масштабы и незначительно отличаются на минутных интервалах, что, видимо, связано с особенностями работы каждого из датчиков.

Таким образом, показано, что геоакустическая эмиссия индуцируется локальными деформационными процессами, распространяющимися с определенными скоростями и в заданных направлениях.

Для оценки эффективности генерации геоакустической эмиссии было построено распределение амплитуды акустического сигнала в зависимости от скорости деформационного процесса, рис. 6. Откуда видно, что с увеличением скорости деформаций растет среднее значение амплитуды акустического сигнала, а его распределение меняется по форме, становясь более пологим. Причем число импульсов уменьшается, но их средняя энергия растет, а значит, увеличивается средний размер трещин или деформационных подвижек. В этом проявляется специфика нелинейного механизма генерации геоакустической эмиссии.

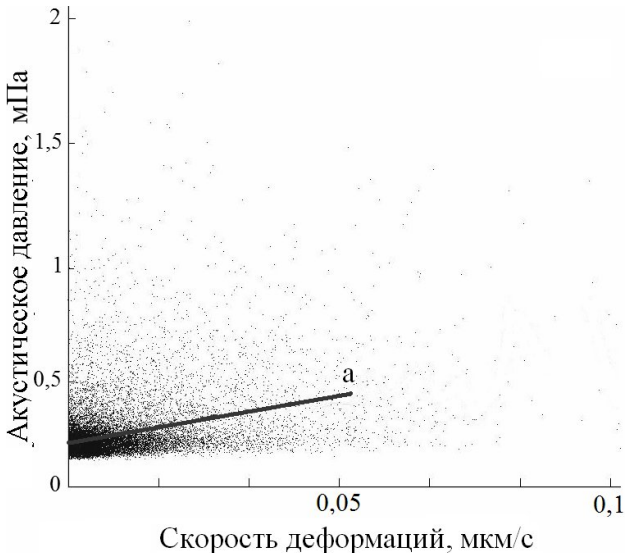


Рис. 6. Распределения амплитуды геоакустического сигнала (плотность точек по вертикали) в зависимости от скорости деформаций и среднее значение амплитуда сигнала (а).

В разделе 3.4 рассматривается геоакустическая эмиссия, индуцированная сейсмическими волнами.

В предыдущих разделах шла речь о медленных или квазистатических изменениях деформаций. Первые имеют временной масштаб десятки минут, вторые – часы и более. Однако имеются еще деформационные возмущения, связанные с приходом сейсмических сигналов, которые длятся десятки секунд. Представляет интерес рассмотреть сейсмические волны в качестве ударного воздействия на область наблюдений и исследовать геоакустический отклик ее пород. Спектральные особенности этого отклика могут содержать информацию о геофизических свойствах области наблюдений.

Сейсмический сигнал, распространяясь на большие расстояния, сохраняет свои основные, низкие частоты и меняет высокочастотную окраску, возникающую в каждой из областей, через которые он проходит. Эта окраска или высокочастотная акустическая оболочка сейсмического сигнала, возникающая в результате нелинейного взаимодействия со средой, и представляет интерес для прикладных исследований в целях разработки методов дистанционного зондирования. Высокочастотная компонента сейсмического сигнала должна зависеть от состояния приповерхностных пород, что можно использовать в целях прогноза эффективности генерации геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений.

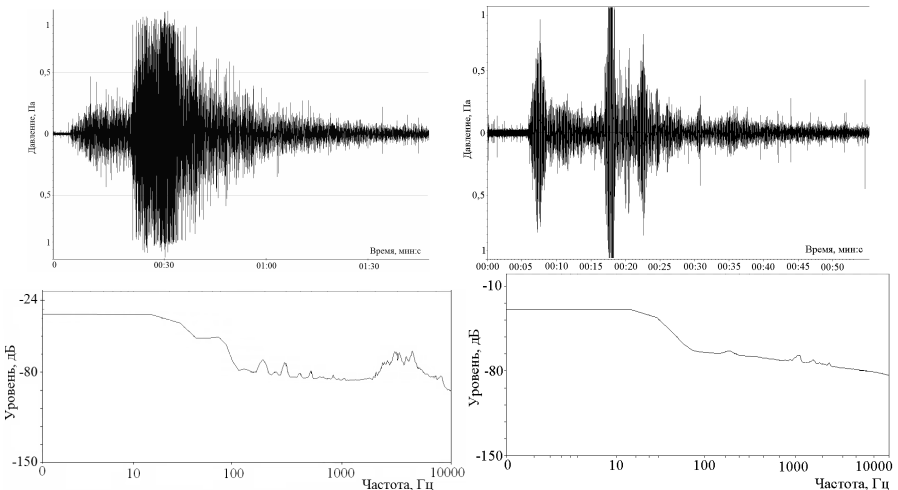


Рис. 7. Сигналы землетрясений (вверху), зарегистрированные широкополосными акустическими приемниками на оз. Микижа (слева) и р. Карымшина (справа), и их спектры (внизу, соответственно).



Большинство сейсмических событий, происходящих в радиусе 200 км от пунктов наблюдений, хорошо регистрируются деформографом и геоакустическими системами. А у сильных землетрясений радиус влияния еще больше, но они редки, поэтому лучше рассматривать средние и малые землетрясения, которые на Камчатке случаются до десяти событий в сутки.

Пример сейсмического сигнала, зарегистрированного двумя акустическими системами, показан на рис. 7 (верхняя панель). Отчетливо виден приход Р и S волн. Спектры сигналов приведены на нижней панели рис. 7. В области спектра 0-100 Гц сигнал имеет мощную низкочастотную составляющую, которая формируется в очаге землетрясения. А в области частот 0.1-10 кГц особенности спектра сигнала связаны с направлением прихода сейсмической волны, строением пород и состоянием среды. Эти особенности и представляют интерес для целей дистанционного зондирования поверхностных пород с помощью наблюдений геоакустической эмиссии, индуцированной быстрыми деформационными волнами. Этот подход к исследованию акустической эмиссии можно назвать динамическим.

Во время прохождения сейсмического сигнала в показаниях деформографа наблюдаются сбросы. Это указывают на то, что среда наблюдений постоянно находится в напряженно-деформированном состоянии, а с землетрясением наступает разрядка.

## **Заключение**

По результатам исследований широкополосной геоакустической эмиссии осадочных пород в условиях деформационных изменений можно сделать следующие выводы:

1. на основе анализа экспериментальных данных установлена связь деформационных и акустических процессов;
2. определены особенности сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии осадочных пород в спокойных условиях, при активизации гедеформационных процессов и во время прихода сейсмических волн;
3. показано, что геоакустические сигналы представляют собой череду релаксационных импульсов, частота следования которых в периоды деформационных возмущений возрастает;
4. показано, что геоакустические сигналы имеют свойства фликер-шумов, а амплитудно-частотное их распределение под-

- чиняется степенной зависимости, аналогичной закону повторяемости землетрясений Гуттенберга-Рихтера;
5. увеличение интенсивности высокочастотной геоакустической эмиссии осадочных пород является следствием роста скорости деформационных процессов;
  6. на основе анализа пространственных и временных корреляций акустических сигналов и показаний деформографа установлен волновой характер деформационных процессов;
  7. показано, что интенсивные деформационно-акустические возмущения возникают, как правило, в периоды подготовки сейсмических событий и могут рассматриваться в качестве комплексных предвестников землетрясений;

По теме диссертации опубликовано **18** работ, **7** – в изданиях из списка ВАК (из которых **4** – в центральных журналах) и **11** – в трудах конференций. Список основных публикаций приведен ниже.

1. Купцов А. В., **Ларионов И. А.**, Шевцов Б. М., Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 4. С.45-49.
2. 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.
3. Долгих Г.И., Купцов А.В., **Ларионов И.А.**, Овчаренко В.В., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений.// Доклады академии наук, 2007, т.413, №1, С. 96-100.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Купцов А.В., **Ларионов И.А.**, Марапулец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения.// Акустический журнал, 2008, том 54, №1, С. 97-109.
5. **Ларионов И. А.**, Шевцов Б. М., Купцов А. В., Экспериментальные исследования аномалий геоакустической эмиссии, соответствующей ранней стадии развития сейсмических событий//Вестник. КРАУНЦ,серия науки о Земле, Петропавловск-Камчатский, 2004, №3 С.46-52.
6. **Ларионов И.А.**, Щербина А.О., Мищенко М.А., Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в

- разных пунктах наблюдений//Вестник. КРАУНЦ, серия науки о Земле, Петропавловск-Камчатский, 2005, №2 С.108-115.
7. Щербина А.О., Мищенко М.А., **Ларионов И.А.**, Аппаратно-программный комплекс мониторинга геоакустической эмиссии//Вестник. КРАУНЦ, серия науки о Земле, Петропавловск-Камчатский, 2005, №2 С.128-132.
  8. Marapulets Y., Kuptsov A., **Larionov I.**, Mischenko M., Sherbina A., Gordienko V.. Anisotropy of high-frequency geoacoustic emission at different stages of seismic event preparation. //XXIV General Assembly Of The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007), 2-13 July 2007, Perugia, Italia.
  9. Долгих Г.И., Купцов А.В., **Ларионов И.А.**, Овчаренко В.В., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные процессы земной коры переходных зон Камчатского и Приморского регионов// IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С. 15-18.
  10. Купцов А.В., **Ларионов И.А.**, Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на увеличение сейсмической активности и процесс подготовки сильных землетрясений на Камчатке. Сборник научных трудов 3 международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», П.-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2004, Ч.1 -С.71-82.
  11. Купцов А.В., Богданова Т.А., **Ларионов И.А.**, Шевцов Б.М., Шумилов Ю.С. Изменения характера акустической эмиссии Земли, соответствующие ранней стадии развития сейсмических событий //Сб. III Всеросс. симпозиума “Сейсмоакустика переходных зон” Владивосток. 2003. С. 108-109.
  12. Долгих Г.И., Купцов А.В., **Ларионов И.А.**, Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Чупин В.А., Яковенко С.В. О связи геоакустической эмиссии и деформационных процессов в осадочных породах // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007 г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб.докл.]. П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. С.134-139.

Ларионов Игорь Александрович

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ДЕФОРМАЦИЙ  
ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

АВТОРЕФЕРАТ

Отпечатано в

---

Подписано к печати  
Заказ

Формат 60x84/16  
Тираж 100 экз.