

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Лаборатория цунами

На правах рукописи

МОРОЗОВ Виктор Евгеньевич

УДК 550.34

**МОНИТОРИНГ И АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ
ОКЕАНСКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

25.00.28 - Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Москва 2005

Работа выполнена в лаборатории цунами Института
Океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук,

Е.В. Сасорова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,

М.А. Носов

кандидат физико-математических наук

С.А. Ковачёв

Ведущая организация:

Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)

Защита состоится 15 февраля 2005 г. в 14⁰⁰ часов на
заседании диссертационного совета К002.239.01 при Институте
океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу:

117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан 13 января 2005 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,

С.Г. Панфилова

Общая характеристика работы.

Актуальность темы:

Многочисленные наблюдения за акустическим шумом океана показывают, что одной из его компонент является сейсмическая. Сейсмический шум в океане наблюдается в большинстве регионов, т.к. океанское дно подвержено не только движению относительно континентов, но и трещинообразованию вследствие сжатий и растяжений. Сейсмический шум несёт энергию множества слабых и сильных землетрясений как континентальных, так и подводных, также на уровень шума оказывает влияние вулканическая деятельность и сходы подводных оползней. Раньше сейсмические шумы рассматривались как помеха. Изучение этих шумов важно для решения ряда геофизических задач, а также для обеспечения нужд подводной акустики и подводной навигации.

Задача предупреждения локальных цунами, с очагом землетрясения на дне океана в непосредственной близости от берега, в настоящее время остается нерешенной, а разрушительные последствия от этих событий являются особенно сильными. Формирование сигнала тревоги цунами ни по мареографическим, ни по сейсмическим данным для таких событий в настоящее время не представляется возможным. Одним из способов вероятного решения этой задачи может быть регистрация и выделение сигналов, предшествующих сильным подводным землетрясениям вблизи береговой зоны. Регистрация сейсмических шумов, предшествующих землетрясениям чрезвычайно актуальна в связи с нарастающим темпом использования ресурсов океанского шельфа и береговой зоны и необходимостью своевременного прогнозирования последствий катастрофических явлений для береговой зоны.

Свидетельством актуальности изучения сейсмического шума океана является множество публикаций, появившихся в последнее время. Гидроакустический мониторинг в настоящее время рассматривается как перспективная технология для регистрации океанской сейсмичности. За последнее десятилетие данные американской системы SOSUS и японской кабельной системы JAMSTEC стали легко доступными через интернет.

Изучение пространственно-временных характеристик и изменчивости зарегистрированных шумов представляется весьма важным для более глубокого

понимания процессов происходящих при движении литосферных плит и общего сейсмического шума океана в зависимости от региона.

Цели и задачи работы:

Выделение сигналов сейсмического происхождения на фоне шумов судов и на фоне шумов метеорологического происхождения. Выделение и исключение сигналов приборных помех, метеорологических шумов, а также сигналов антропогенного происхождения, таких как шумы судов.

Анализ гидроакустических записей сейсмических событий разного энергетического уровня (землетрясений и микроземлетрясений), анализ зависимостей амплитуды и частоты от времени. Выделение сейсмической структуры сигнала (времена вступления волн) из гидроакустических сигналов от землетрясений.

Определение связи микроземлетрясений с приповерхностной дилатантной зоной будущих землетрясений. Выявление связи слабых землетрясений с будущими более крупными событиями. Изучение временных последовательностей микроземлетрясений при проходе сейсмических волн от удаленных событий.

Для достижения поставленных целей требовалось решить ряд задач, основными из которых являлись следующие:

Отбор имеющихся в наличии гидроакустических данных. Временные и пространственные привязки экспериментов.

Разработка методики и пакета программ для обработки и анализа оцифрованных гидроакустических записей с ГДАС (глубоководные донные автономные станции) в районах Охотского и Японского морей и Тихого океана вблизи Камчатки, а также с эксперимента АТОК (акустическая термометрия океанского климата) на антенне АГАМ. Программное обеспечение не должно иметь ограничений на длительность оцифрованных гидроакустических записей (размер суточной записи с ГДАС около 3 гигабайт). Процесс анализа должен быть автоматизирован, т.к. количество записей велико (несколько сотен рядов).

Анализ локального каталога землетрясений на наличие землетрясений во время записей океанских шумов.

Выделение сигналов от каталогизированных событий, а также от землетрясений меньшей силы, которые не были зарегистрированы локальной сетью стационарных сейсмических станций.

Построение амплитудных и частотных зависимостей для выделенных сигналов землетрясений и микроземлетрясений и интерпретация результатов.

В процессе обработки результатов эксперимента были получены следующие результаты:

По данным регистрации шумов океана зарегистрированы гидроакустические сигналы от 10 землетрясений в районе Курильских островов, Камчатки и Алеутских островов.

Зарегистрировано более 100 слабых землетрясений, находящихся ниже порога чувствительности береговой сети стационарных сейсмических станций, которые в данной работе называют микроземлетрясениями.

Установлено, что, как правило, гидроакустический сигнал землетрясений, находящихся на расстоянии более 400-500 км несёт частоты ниже 30-40 Гц. В случае близких землетрясений на расстояниях менее 500 км в сигнале могут присутствовать частоты выше 1000 Гц. В любом случае гидроакустический сигнал ограничен в частотном диапазоне сверху, а низкочастотный диапазон заполнен всегда.

Установлено, что гидроакустический сигнал от микроземлетрясений длится от 1 секунды до 140 секунд, в то время как гидроакустический сигнал от каталогизированных землетрясений, т.е. зарегистрированных береговой сетью стационарных сейсмических станций длится от 70 до 1500 секунд. Оценка энергии микроземлетрясений проводилась по длительности гидроакустического сигнала с использованием калибровочной кривой Соловьёва, Ковачёва (1996) и Брочера ($M_b = 2.30 + \lg T$, Brocher 1983). Вышеперечисленные калибровочные кривые показали хорошую сходимость оценок энергии с береговой сетью.

Основные научные результаты:

Выделены и проанализированы сейсмические сигналы, возникающие в приповерхностной дилатантной зоне в процессе подготовки землетрясения, и показано, что эволюция этих сигналов по мере приближения к моменту основного толчка совпадает с теоретическими представлениями о дилатантных зонах.

Определены частотные характеристики акустических сигналов от сейсмических источников (землетрясений) с различными параметрами (энергетический класс, глубина гипоцентра, расстояние до регистрирующей аппаратуры и географическое положение гипоцентра).

Получены количественные оценки частоты следования слабых землетрясений на материковом склоне Камчатки.

Создана методика и пакет программ для анализа гидроакустических сигналов в интервале 2 - 1400 Гц, генерируемых сейсмическими событиями в океане.

Определен порог регистрации гидроакустического сигнала от сейсмических событий, зависящий от класса землетрясения и расстояния от его эпицентра до приёмного устройства.

Научная новизна исследований:

Выделены гидроакустические сигналы сейсмического происхождения, предшествующие океанским землетрясениям.

Получено первое подтверждение существования и эволюции приповерхностной зоны дилатансии в процессе подготовки землетрясения.

Проведён мониторинг сейсмического режима зоны Курило-Камчатского жёлоба гидрофонами, помещёнными на шельфе и континентальном склоне. Выявлено множество слабых землетрясений постоянно происходящих в этой зоне. Установлено что характер самих сигналов и характер их следования сильно зависит от региона. Характер следования микроземлетрясений может нарушаться после прохождения сейсмической волны, как и в случае с сейсмической эмиссией.

Практическая значимость работы:

Показано, что в некоторых случаях процесс подготовки подводного землетрясения проявляется в виде появления приповерхностных разрывов в эпицентральной зоне будущего землетрясения. Приповерхностные разрывы сопровождаются микроземлетрясениями, гидроакустический сигнал от которых может регистрироваться гидрофонами, расположенными в океане. Таким образом, гидроакустические сигналы могут использоваться для определения эпицентральной зоны будущего землетрясения, а разработанный метод гидроакустического мониторинга сейсмического процесса может быть использован для систем предупреждения о локальных цунами и землетрясениях.

Полученные результаты можно использовать для дальнейшего анализа гидроакустических записей и выявления сигналов сейсмического происхождения. Результаты диссертации могут быть использованы при составлении более детальных каталогов землетрясений по данным гидроакустического мониторинга.

В связи с проведёнными исследованиями открывается ряд проблем для дальнейшего изучения, решение которых позволит продвинуться вперёд в понимании сейсмических процессов, происходящих в океане. Таким задачами являются более детальный анализ поля создаваемого сейсмическим источником в океане и земной коре и дополнение каталогов землетрясений по результатам гидроакустических наблюдений. Продолжением этой работы может быть исследование зависимости наличия приповерхностных разрывов перед землетрясением от его магнитуды и глубины очага. Построение скоростной зависимости различного типа волн от глубины в шельфовой зоне также может являться продолжением этой работы т.к. эта зависимость является ключевой для локации гипоцентра землетрясения.

Обоснованность научных положений и выводов:

В работе использованы данные известных экспериментов, таких «как регистрация шумов океана станциями ГДАС в 1988 году и данные эксперимента АТОК, проводившегося в 1998-1999 годах.

Обоснованность результатов основывается на огромном массиве данных подвергнутых обработке и контролю. Используются стандартные методы контроля данных и их обработки. Полученные результаты статистически достоверны, поскольку они базируются на большом массиве данных, а не на отдельных частных измерениях. Достоверность данных подтверждается сходством результатов с теоретическими представлениями о процессах разрушения и подготовки землетрясений по результатам, полученным на системе SOSUS в США.

Апробация работы:

Результаты, изложенные в диссертации, - были представлены и обсуждались на международных конференциях:

2002 - 3rd Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs. Fairbanks, Alaska, June 2002.

2002- Local Tsunami Warning and Mitigation. Russia, Petropavlovsk-Kamchatski September 2002.

2003 - IUGG 2003, Sapporo Japan, July 2003

Результаты опубликованы в журналах "Доклады Российской Академии Наук" и "Вулканология и сейсмология", а также в ряде сборников трудов конференций.

Результаты докладывались и обсуждались на семинарах в Институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН в Москве и Институте Прикладной Физики РАН в Нижнем Новгороде.

Личный вклад автора:

Экспериментальные данные, составившие основу для проведения исследований, представленных в диссертации были приведены к виду, пригодному для автоматизированного анализа лично автором. Автор лично разработал пакет программ для анализа гидроакустических данных с АГАМ и ГДАС, причём программы и методики универсальны и при изменении параметров готовы для использования на данных новых экспериментов. Автор произвел интерпретацию гидроакустических сигналов всех представленных в работе микроземлетрясений и землетрясений, составил каталоги микроземлетрясений. Иллюстративный материал, представленный в работе, получен с помощью программного пакета, физическую идею, алгоритмы и программный код которого разработал автор. Распознавание сигналов от землетрясений и отделение от них сигналов, иного происхождения проведено лично автором. Автором был обработан, проанализирован и обобщён большой массив данных экспериментов, составляющий по объёму около 20 компакт-дисков, т.е. около 15 гигабайт экспериментальных данных.

По теме диссертации написано и опубликовано 5 статей и результаты представлены лично автором на 3 международных конференциях и в нескольких научных организациях в России.

Структура работы:

Диссертация состоит из введения, трёх глав и выводов, списка использованной литературы (82 наименования). Диссертация изложена на 121 странице, содержит 72 рисунка, 7 таблиц. Имеются ссылки на интернет ресурсы, с которых были получены те или иные данные или карты.

Содержание работы:

Во введении дана краткая характеристика работы и поставлены основные проблемы, которые будут обсуждаться. Кратко изложена актуальность темы.

Глава 1. Обзор работ по изучению процесса подготовки землетрясений и гидроакустическим наблюдениям в океане за сейсмическими событиями.

В главе 1 обсуждаются процессы разрушения горных пород в очаговой зоне, сформулированы закономерности, имеющие ключевое значение для поиска предвестников и прогноза землетрясений такие как: развитии системы трещин, ступенчатый переход размеров трещин от мелких к более крупным и перестройка системы трещин. Отмечается, что многие геофизические поля могут испытывать влияние процессов раскрытия микротрещин. И изменения в параметрах этих полей может быть связано с подготовкой землетрясений, что отмечается в рассмотренных публикациях. Именно на вариациях этих полей основаны большинство предвестниковых методов, как правило, в работах рассматривается одно поле, хотя все эти поля изменяются синхронно. Алексеев, Белоносов, Петренко (2001) предлагают использовать интегральный предвестник - пространственно-временную функцию плотности числа трещин в области готовящегося очага и в зонах аномальных геофизических полей на поверхности земли. Результаты численного моделирования условий возникновения зон дилатансии, сделанные в этой работе позволяют допускать возможность образования трещин на расстояниях 200-300 км от очага будущего землетрясения. Дилатансия - это нелинейное разуплотнение среды за счёт образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. Показано, что дилатантная зона состоит из двух частей, одна из которых локализована около очага, а другая около поверхности.

Рассмотрены результаты лабораторных экспериментов по разрушению пород (Соболев, Пономарёв, Смирнов, Завьялов), результаты которых во многом совпадают с теоретическими представлениями обсуждёнными ранее. Непосредственно перед процессом разрушения наблюдается заметное увеличение интенсивности сейсмоакустической эмиссии. Однако выделить сигналы из дилатантной зоны в натурных наблюдениях до сих пор не удавалось.

Наблюдается возрастание сейсмоэмиссионной активности в период подготовки землетрясений и спад этой активности после события, т.е. после разрядки напряженного состояния среды. Возрастание сейсмической активности может предваряться затишьями длительностью в несколько лет.

Рассматривается ряд работ, посвященных сейсмической эмиссии в напряжённых средах, где исследуется отклик среды на напряжённое состояние. Обсуждается тематика сейсмических наблюдений, наблюдений донных сейсмометров и других явлений, связанных с рассматриваемым в работе регионом (Камчатка), а также непосредственно связанных с микроземлетрясениями, изучаемыми в работе. Микроземлетрясения во многих случаях составляют фон сейсмической эмиссии.

Даётся современное представление о гидроакустических наблюдениях сейсмических шумов, представлены некоторые результаты других авторов. Рассмотрены гидроакустическая система Соединённых Штатов Америки (SOSUS) и Японии (JAMSTEC), приведены некоторые результаты наблюдений. Например, наблюдения микроземлетрясений системой SOSUS на Срединно-Атлантическом хребте, недоступных для регистрации береговыми системами.

Последняя часть главы посвящена анализу распространения сигнала в многослойной среде (скальные породы, осадочные породы, вода). Даны основные характеристики сред, в которых распространяется сигнал от землетрясения. Рассмотрены законы затухания сигналов в различных средах в зависимости от частоты. Показано, что высокочастотные сигналы практически полностью затухают в грунте на нескольких километрах, но при проникновении сигнала в воду его распространение в водной среде возможно на большие расстояния, чем в грунте по причине меньшего затухания сигнала по сравнению с осадками и скальными породами. Таким образом, сигналы с частотами в десятки герц могут полностью затухнуть до выхода на границу раздела земля-вода, если расстояние от источника до дна более нескольких километров. Таким образом, на гидрофонах могут быть зарегистрированы сигналы от приповерхностных землетрясений либо сигналы из приповерхностной зоны дилатансии.

Глава 2. Исследование шума океана с помощью глубоководных донных автономных станций.

В Главе 2 представлены исходные данные и их анализ. Подробно рассмотрены характеристики приборов ГДАС (глубоководные донные автономные станции), места постановок и условия экспериментов. Для анализа шумов, записанных с ГДАС, мы использовали данные только тех экспериментов, которые были адекватно привязаны во времени и пространстве и где были известны все необходимые детали постановки важные для нас (точность по времени не хуже получаса, наличие частотного канала ниже 100 Гц и привязка в пространстве не хуже десяти миль).

На записях выделялось два типа сигнала сейсмического происхождения: землетрясения, зарегистрированные береговой сетью стационарных сейсмических станций включённые в каталоги и микроземлетрясения, которые регистрируются только на гидроакустических записях.

Выбраны постановки ГДАС в районе полуострова Камчатка, Курильских островов, Охотского и Японского морей. В работе представлены данные и результаты обработки трёх наиболее удачных постановок: ГДАС 27 постановки 22 и 31 марта 1988 года, а также ГДАС 38 постановка 13 мая 1988 года. Описаны две другие постановки, на которых не удалось выделить сейсмические события, но они дали представления о шумах регионов со слабой сейсмической активностью. В постановках в Охотском и Японском море не наблюдалось сигналов микроземлетрясений, в отличие от постановок вблизи Курило-Камчатского жёлоба.

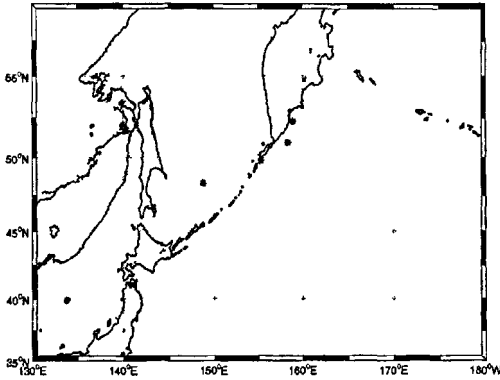


Рис 1. Карта постановок пяти станций ГДАС

Постановка ГДАС-27 31 марта 1988 года

Проведён анализ записи длиной 15 часов 20 минут. Обнаружено более 60 микроземлетрясений, проведён анализ и временного распределения и длительностей и отмечена смена режима генерации микроземлетрясений после прохождения сейсмической волны от землетрясений на расстоянии 450 км от эпицентра. За 6 часов перед землетрясением отмечается увеличение длительности микроземлетрясений, которая уменьшается после основного толчка. Приведен каталог всех зарегистрированных микроземлетрясений, а для двух длительных событий представлены результаты анализа, в которых видно, что длительность низкочастотной компоненты гидроакустического сигнала всегда больше чем высокочастотной, и высокочастотная компонента всегда приходит раньше низкочастотной.

Постановка ГДАС-38 13 мая 1988 года

Проведён анализ суточной записи и семи землетрясений, произошедших в районе постановки во время эксперимента. Пять из семи землетрясений имели гидроакустический сигнал, два не имели. Два незарегистрированных гидрофонами землетрясения, не только находились на континенте, но и были наиболее глубокими и слабым. Выявлены закономерности частотных картин от времени в зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения. Получен порог

регистрации землетрясения в зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения и его класса. Подробно проанализировано каждое зарегистрированное землетрясение. Представлен каталог микроземлетрясений.

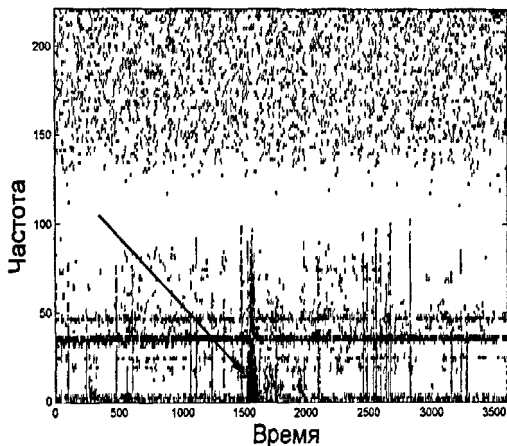


Рис. 2. Пример землетрясения, зарегистрированного станцией ГДАС

Параметры землетрясения:

Дата и время. 1988/05/13 03.20 41 6

Координаты: 54 63 с. ш. 161 04 в. д

Глубина 89 км

Класс землетрясения. 9.4 Ks

Расстояние до приёмника 278 км

Отсутствие возможности выделить направление на источник сигнала не позволяет точно позиционировать источник землетрясений, но позволяет оценить микросейсмический и сейсмический режим района постановок.

Удалось выделить несколько закономерностей: зависимость класса землетрясения и расстояния до приёмника и возможности его регистрации. Определена также зависимость частотного диапазона от расстояния до эпицентра землетрясения и его класса. Далёкие землетрясения содержат в гидроакустическом сигнале только низкочастотную компоненту, а у близких событий присутствует и высокочастотная компонента.

Обнаружено, что в районе постановки ГДАС 38 вблизи Авачинского залива с глубиной океана 1980 метров, микроземлетрясения происходят реже (17 за

сутки), но характерная длительность - это десятки секунд. В районе постановки ГДАС 27 с глубиной океана 820 метров, т.е. ближе к Курило-Камчатскому жёлобу микроземлетрясений происходит больше (около 60 за 15 часов 20 минут), но их характерная длительность менее 10 секунд. В обоих случаях микроземлетрясения имеют тенденцию объединяться в группы.

Отмечено, что практически все микроземлетрясения имеют характерную длительность гидроакустического сигнала менее 100 секунд, а сигнал практически всех каталогизированных землетрясений имеет длительность более 100 секунд

Станции ГДАС регистрируют каталогизированные землетрясения, т.е. землетрясения, которые были зарегистрированы сетью стационарных сейсмических станций Камчатки. Таким образом, накопив достаточное количество событий, можно будет построить калибровочную кривую и возможность оценивать энергию микроземлетрясений и землетрясений по данным гидрофона.

Существуют регионы, где подобные постановки нецелесообразны по причине отсутствия сейсмичности, например районы Охотского и Японского морей не дают большого количества землетрясений, а микроземлетрясения за рассматриваемый период не наблюдались. Таким образом, отсутствие микроземлетрясений обусловлено либо осадочным чехлом, который поглощает их сигналы, но, скорее всего, микроземлетрясения отсутствуют в этом регионе или их число крайне мало.

Глава 3. Исследование шума океана по данным эксперимента АТОК1998-1999 (антенны АГАМ, Тихоокеанский шельф Камчатки)

В Главе 3 описываются результаты анализа данных, полученных во время эксперимента АТОК.

Нами были использованы данные эксперимента 1998-1999 годов по международной программе «АТОК» (Акустическая Термометрия Океанского Климата), где изучалось распространение сигнала по трассе Гавайи - Камчатка. Для выделения сейсмических сигналов из океанского шума применялись данные, полученные с антенны АГАМ (разработка ЦНИИ «Морфизприбор»). Антенна представляет собой большой матрицу из гидрофонов, ведущую многоканальную запись. Это плоская гидроакустическая антенна погружена в океан таким образом, что находится в непосредственной близости от дна. Площадь ее зеркала - 170 м², размеры: 100 м по горизонтали и 17 м по вертикали. Она состоит из 2400 гидрофонов, которые расположены в виде прямоугольной матрицы (120

вертикальных рядов по 20 гидрофонов в каждом ряду). Каналы расположены последовательно в горизонтальном направлении, что дает возможность отслеживать направление прихода сигнала на антенну в горизонтальной плоскости. Преимуществом многоканальной записи является то, что частотные характеристики датчиков во многих случаях не являются постоянными во времени, и наличие нескольких каналов позволяет выявлять аппаратные сбои и более адекватно анализировать данные, полученные с гидрофона.

Регистрация проводилась на тихоокеанском шельфе полуострова Камчатка в период с 12 июля 1998 года по 21 марта 1999 года. Были проанализированы 162 непрерывные записи, произведённые в период с 12 июля 1998 года по 21 марта 1999 года. Каждая запись содержала чуть более 22 мин. Данные этого эксперимента, в отличие от данных с ГДАС, дают возможность следить за направлением прихода сигнала т.к. используется группа гидрофонов. В данных этого эксперимента была возможность отличать некоторые аппаратные шумы от внешних сигналов.

Использован полосовой аппаратный фильтр на диапазон частот 50Гц-100Гц. В процессе эксперимента использовалось 14 каналов антенны АГАМ. Таким образом, исходные данные представляют собой 14-канальную запись, когда для каждого временного отсчета фиксируется 14 значений.

Для поиска совпадений во времени сейсмических событий и гидроакустических записей использовался региональный каталог землетрясений Камчатского региона (<http://emsd.iks.ru/>). Во время сеансов регистрации произошло 16 землетрясений, 4 из которых удалось выделить на гидроакустических записях. Кроме того, были зарегистрированы несколько десятков микроземлетрясений.

Проведён анализ всех сигналов землетрясений и микроземлетрясений предшествовавших им. Проанализированы записи стационарных сейсмических станций, на которых не было обнаружено сигналов от регистрируемых подводных микроземлетрясений.

Определён порог регистрации для этой системы с учётом фильтрации частот ниже 50 Гц. Проведено сравнение результатов с ГДАС, которое показало, что регистрация низких частот крайне важна для выделения сигналов сейсмического происхождения.

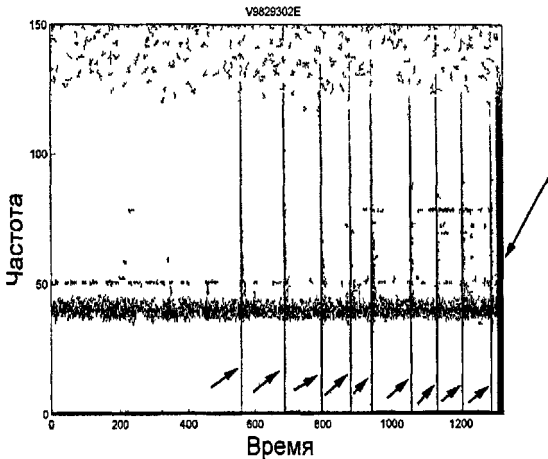


Рис 3 Спектрограмма записи 20 октября 1998 года

Отмечено девять микроземлетрясений, помеченных маленькими стрелками, и начало крупного землетрясения в конце записи

Проанализирована запись 20 октября 1998 г, на которой основному толчку предшествовало 9 микроземлетрясений, а в конце записи зафиксировано начало самого землетрясения. Направление на микроземлетрясения совпало с направлением на эпицентр будущего землетрясения. В этом случае на гидроакустической записи была полностью сохранена структура сейсмического сигнала, что позволило выделить фазы сейсмического сигнала Р и переотраженную на границе раздела вода-дно в волну сжатия S волну. По разнице во времени прихода этих волн произведена оценка глубины очагов всех микроземлетрясений (менее 500 метров). Поскольку глубина гипоцентра землетрясения была 119 км, а микроземлетрясений были приповерхностные, то можно утверждать, что эти микроземлетрясения были сформированы в приповерхностной зоне дилатансии. Береговые станции не зарегистрировали ни одно из этих событий. Таким образом, получено подтверждение наличия приповерхностной зоны дилатансии у землетрясений с глубиной гипоцентра более 100 км и показано, что сигналы, предшествующие землетрясению, источником которых является приповерхностная зона дилатансии, можно регистрировать с помощью гидроакустических систем.

Рассмотрена запись 5 февраля 1999 года - в этот день было 6 сеансов записи шумов океана. На пяти записях зарегистрированы микроземлетрясения, которые связаны с происходившими после близкими землетрясениями. Во время одного сеанса регистрации не наблюдалось ни одного микроземлетрясения, т.к. после этого сеанса не было близких землетрясений. В этом случае также наблюдается связь гидроакустических сигналов и последующих землетрясений.

Проанализировано ещё около десяти микроземлетрясений. Два из них связаны с будущими землетрясениями, а остальные рассматривались как независимые слабые события.

В результатах, полученных с АТОК, большинство выводов с ГДАС подтвердились. Было учтено, что применялся полосовой фильтр от 50 до 100 Гц, и при учёте влияния этого фильтра результаты двух экспериментов совпадают, что подтверждает общность этих результатов. Порог регистрации практически совпал с порогом, полученным по данным ГДАС, что показало независимость этого результата от аппаратуры.

Оценка класса землетрясений и микроземлетрясений проводилась исходя из идеи, высказанной в статье Соловьёва, Ковачёва (1996), что для коротких землетрясений длительность записи пропорциональна магнитуде. Для оценки магнитуды сильных землетрясений более точный результат даёт формула из статьи Brocher (1983), адаптированная к нашей задаче.

$$M_b = 2.3 + \lg T$$

Для микроземлетрясений использовалась калибровочная кривая Соловьёва, Ковачёва (1996).

Заключение:

По данным регистрации шумов океана зарегистрированы гидроакустические сигналы от 10 землетрясений в районе Курильских островов, Камчатки и Алеутских островов.

Зарегистрировано более 100 слабых землетрясений, находящихся ниже порога чувствительности береговой сети стационарных сейсмических станций.

Установлено, что, гидроакустический сигнал землетрясений, находящихся на расстоянии более 400-500 км несёт частоты ниже 30-40 Гц. В случае близких землетрясений на расстояниях менее 500 км в сигнале могут присутствовать частоты выше 1000 Гц. В любом случае гидроакустический сигнал ограничен в частотном диапазоне сверху, а низкочастотный диапазон заполнен всегда.

Установлено, что гидроакустический сигнал от микроземлетрясений длится от 1 секунды до 140 секунд, в то время как гидроакустический сигнал от каталогизированных землетрясений, т.е. зарегистрированных береговой сетью стационарных сейсмических станций длится от 70 до 1500 секунд. Оценка энергии микроземлетрясений проводилась по длительности гидроакустического сигнала с использованием калибровочной кривой Соловьёва, Ковачева (1996) и Брочера (Brocher 1983). Вышеперечисленные калибровочные кривые показали хорошую сходимость оценок энергии с береговой сетью.

Выделены и проанализированы сейсмические сигналы, возникающие в приповерхностной дилатантной зоне в процессе подготовки землетрясения, и показано, что эволюция этих сигналов по мере приближения к моменту основного толчка совпадает с теоретическими представлениями о дилатантных зонах.

Определены частотные характеристики акустических сигналов от землетрясений с различным энергетическим классом, глубиной гипоцентра, расстоянием до регистрирующей аппаратуры и географическим положением гипоцентра.

Получены количественные оценки частоты следования слабых землетрясений на материковом склоне Камчатки.

Создана методика и пакет программ для анализа гидроакустических сигналов в интервале 2- 1400 Гц, генерируемых землетрясениями в океане.

Определен порог регистрации гидроакустического сигнала от сейсмических событий, зависящий от класса землетрясения и расстояния от его эпицентра до приёмного устройства.

Основные результаты диссертации содержатся в следующих публикациях:

Лаппо С. С, Левин Б. В., Сасорова Е. В., **Морозов В. Е.**, Диденкулов И. Н., Карлик Я. С. Гидроакустическая локация области зарождения океанического землетрясения. Доклады АН, 2003, Т.388, № 6, с.805-808.

Морозов В. Е., Сасорова Е. В. Высокочастотные сигналы (40 - 110 Гц), предшествующие землетрясениям, по гидроакустическим данным на Тихоокеанском побережье Камчатки. Вулканология и Сейсмология, 2003, № 1, с. 64-74.

Морозов В. Е. Высокочастотные сигналы (40-110 Гц), предшествующие землетрясениям, по гидроакустическим данным на тихоокеанском побережье Камчатки. Сборник статей международной конференции: «Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска», Петропавловск-Камчатский, Москва 2002, с.114-124.

Сасорова Е.В., Диденкулов И.Н., Карлик Я.С., Левин Б.В., **Морозов В.Е.**, Петроченко С.П. Подводные землетрясения вблизи от береговой линии: акустические методы для выделения процесса подготовки землетрясения и перспективы применения для систем предупреждения о цунами. Сборник статей международной конференции: «Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска», Москва, 2002, с.167-180.

E.V. Sasorova, B.W. Levin, **V.E. Morozov** I.N. Didenkulov Hydro-acoustic monitoring on the Kamchatka shelf: a possibility of early location of oceanic earthquake and local tsunami warning. Tsunamis: sources, monitoring and coastal hazards. Ed. Kenji Satake. Kluwer Academic Publishers, 2005 в печати.

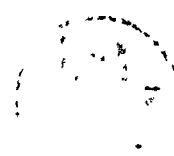
E.V. Sasorova, B.W. Levin, **V.E. Morozov** Hydro-acoustic monitoring of submarine earthquakes: observations and analysis. Recent Advances in Marine Science and Technology 2004,2005 в печати.

Сдано в печать 7 января 2005 г.

Объем печати 1 п.л. Заказ № 522. Тираж 100 экз.

Отпечатано: ООО «Спринт-Принт»
г. Москва, ул. Краснобогатырская, 92
тел.: 963-41-11, 964-31-39

25.00



22 FEB 2005

1287