

На правах рукописи



САЛТЫКОВ Вадим Александрович

**ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМАХ
В СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ**

Специальность 25.00.10 — геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

11 ЯНВ 2017

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



006661898

Москва — 2016

Работа выполнена в Камчатском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”.

Официальные
оппоненты:

Соболев Геннадий Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта
Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва

Спивак Александр Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией приповерхностной геофизики
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт динамики геосфер Российской академии
наук (ИДГ РАН), г. Москва

Шебалин Петр Николаевич,
доктор физико-математических наук, главный научный
сотрудник Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт теории прогноза
землетрясений и математической геофизики Российской
академии наук (ИТПЗ РАН), г. Москва

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский

Защита состоится 23 марта 2017 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д.501.001.63 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ауд. СФА.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и на сайте
<http://www.phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-D501-001-63/>.

Автореферат разослан «___» декабря 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.



В.Б. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования в диссертационной работе являются микросейсмические колебания в земной коре, имеющие частоту в первые десятки Гц и занимающие промежуточный диапазон между сейсмическими волнами от землетрясений и геоакустическими явлениями. Для обозначения этого типа сигналов используется термин “высокочастотный сейсмический шум” – ВСШ, а для его эндогенной компоненты – “сейсмическая эмиссия”. На отдельных этапах выполнения работы как объекты исследования рассматриваются слабые землетрясения (являющиеся, как и сейсмический шум, составной частью единого сейсмического процесса) и акустическая эмиссия (АЭ), рассматриваемая как аналог сейсмичности в ходе лабораторного эксперимента.

Актуальность работы. В работе излагаются результаты исследований автора по решению фундаментальной научной проблемы, связанной с исследованиями механизмов возникновения и инициирования сейсмичности, а также мониторингом геодинамических процессов в литосфере по вариациям параметров геофизических полей. В рамках этой проблематики автором рассматриваются вопросы, связанные с возможностью контроля состояния среды при подготовке сильных землетрясений по параметрам приливных вариаций высокочастотного сейсмического шума (ВСШ).

Актуальность работы имеет практический и теоретический аспекты.

Несмотря на достаточно широкий круг выполненных в мире исследований высокочастотного сейсмического шума и его отклика на приливное воздействие, многие вопросы требуют дополнительных исследований, в частности, это касается получения более качественных экспериментальных данных и статистически обоснованных оценок на их основе, разработки физического обоснования экспериментально выявленных эффектов. Особый интерес представляет изучение модуляции сейсмической эмиссии непосредственно в сейсмически активном регионе, где ожидаются изменения напряженно-деформированного состояния среды, связываемые с подготовкой и реализацией сильных землетрясений. Остается нерешенным вопрос о моделях приливной модуляции, дающих объяснение процесса не только на качественном уровне, но и количественно (физический механизм). Все это определяет теоретическую актуальность диссертационной работы:

Практическая актуальность определяется возможностью использования результатов диссертации при оценке сейсмической обстановки в регионе и прогнозе землетрясений. Предложенная в работе методика выявления предвестника сильных региональных землетрясений, основанная на изменении отклика ВСШ на приливное воздействие, с 1996 г. по настоящее время применяется при оценке сейсмической обстановки в Камчатском регионе в оперативном режиме. Использование формализованных параметров ВСШ для оценки сейсмической опасности нигде более – ни в России, ни за рубежом не проводится, а синхронизация ВСШ с внешним приливным воздействием перед сильными землетрясениями, проявляющаяся в виде стабилизации фазового сдвига, является новым типом параметрических предвестников. В настоящее время эти иссле-

дования могут рассматриваться как мониторинг ВСШ, в который входят ведение непрерывных долговременных наблюдений, обработка и анализ данных, еженедельная подготовка прогностических заключений о сейсмической обстановке. В ходе мониторинга ВСШ при выявлении предвестников сильных региональных землетрясений с $M \geq 6.0$ получены устойчивые положительные результаты.

Однако любые успехи в обнаружении предвестников на основе лишь экспериментально выявленных закономерностей не являются убедительными, если они не подкреплены модельными построениями. Поэтому в качестве следующего этапа в исследованиях ВСШ была выполнена разработка физического обоснования выявленных приливных эффектов и математическое моделирование дальнего действия рассматриваемого предвестника сильного землетрясения.

Тематика выполненных исследований соответствует

– Приоритетным направлениям фундаментальных исследований в области наук о Земле (Постановление Президиума РАН № 233 от 01.07.2003 г.): *6.1. Физические поля Земли, их природа, взаимодействие и интерпретация; 6.3. Современная геодинамика, движение и напряженное состояние земной коры, сейсмичность и сейсмический прогноз;*

– Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 годы (*направление № 64. Катастрофические процессы природного и техногенного происхождения, сейсмичность – изучение и прогноз. Развитие методов выявления детерминированных составляющих в хаотическом потоке сейсмичности и связанных с ней геофизических полей*);

– Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (*направление № 70. Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы. Выяснение механизмов преобразования и взаимодействия физических полей Земли на границе земная кора–атмосфера, оценки корреляционных связей вариаций геофизических полей с лунно-солнечным приливом*).

Цель работы. Разностороннее исследование воздействия земных приливов на сейсмичность низкого энергетического уровня, включающее

– обобщение результатов о свойствах приливных эффектов, проявляющихся сходным образом в различных геологических условиях и на различных масштабных уровнях сейсмичности,

– определение условий, при которых проявляется воздействие земных приливов на сейсмический шум,

– физическое и математическое моделирование этого процесса.

Задачи работы

1. Организация пунктов регистрации ВСШ и проведение многолетних режимных наблюдений с целью обеспечения информационной основы дальнейших исследований;
2. Исследование особенностей приливного отклика ВСШ;

3. Моделирование эффекта модуляции ВСШ приливным воздействием. Для решения этой задачи отдельно рассматриваются:

- приливные эффекты, обусловленные нелинейностью свойств гетерогенных сред в процессе распространения через них микросейсмического излучения (физический механизм);
- действие приливов непосредственно на активность источников сейсмической эмиссии (лабораторное моделирование): влияние земных приливов на сейсмичность воспроизводится в контролируемых лабораторных условиях;

4. Решение проблемы дальнего действия зоны подготовки землетрясения на область сбора ВСШ (математическое моделирование);

5. Сопоставление особенностей приливного отклика сейсмичности на различных энергетических уровнях: ВСШ и слабые землетрясения.

Фактический материал. В работе используются данные многолетних (начиная с 1990-х годов) режимных наблюдений на специализированных пунктах регистрации высокочастотного сейсмического шума, расположенных на Дальнем Востоке, в частности, на Камчатке, где они входят в систему комплексного геофизического мониторинга (КФ ФИЦ ЕГС РАН). Рассматриваемые каталоги слабых землетрясений (с магнитудой $M_L \geq 3.5$) также получены в ФИЦ ЕГС РАН в ходе детальных сейсмологических наблюдений. Материалы, относящиеся к лабораторным экспериментам с акустической эмиссией, были получены в Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН в ходе совместных работ.

Методы исследования. При рассмотрении приливных эффектов в сейсмических шумах комплекс работ включил в себя:

- многолетние натурные измерения сейсмического шума специализированными пунктами регистрации, расположенными в различных сейсмоактивных регионах: п-ов Камчатка, о. Шикотан (Курильские о-ва), о. Хоккайдо (Япония);
- анализ параметров сейсмического шума, связываемых с приливым воздействием, в целях мониторинга геодинамической обстановки;
- лабораторный эксперимент по разрушению образцов горных пород при одноосном сжатии, моделирующем приливное воздействие в условиях тектонической деформации;
- вычислительный эксперимент, направленный на решение вопроса о дальнем действии очага сильного землетрясения на основе гипотезы о развитии протяженных зон приповерхностной дилатансии;
- физическое обоснование приливных эффектов в сейсмических шумах (от реологической модели к физическому механизму) на базе известного в акустике механизма негистерезисных амплитудно-зависимых потерь.

Защищаемые положения

На защиту выносятся:

1. эффект приливной модуляции сейсмических шумов, имеющий следующие

особенности: (i) нестабильность во времени; (ii) характерная глубина модуляции на уровне нескольких процентов; (iii) связь с напряженно-деформированным состоянием среды, отражаемым в подготовке сильных локальных землетрясений;

2. новый тип параметрического предвестника землетрясений, характеризуемый стабилизацией фазового сдвига между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом.

3. механизм приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов за счет модуляции размера области их сбора, обусловленной негистерезисным амплитудно-зависимым поглощением в земных породах, позволивший дать объяснение ряду экспериментально обнаруженных особенностей ВСШ.

Научная новизна работы

1. Синхронизация ВСШ с внешним приливным воздействием рассматривается как прогностический признак и является новым, ранее не обнаруженным предвестником землетрясений.

2. Проведенные лабораторные эксперименты по моделированию приливных эффектов в сейсмичности (одноосное сжатие образцов) показали существование амплитудной модуляции акустической эмиссии на стадии предразрушения образца в условиях малых периодических осцилляций деформации (превышение на три порядка медленно меняющейся фоновой деформации над модулирующей соответствует соотношению между тектонической и приливной деформациями).

3. Обнаружена зависимость характера отклика акустической эмиссии на периодическое воздействие от напряженного состояния образца.

4. Предложено объяснение известному уже более 30 лет, но не имевшему удовлетворительной интерпретации эффекту корреляции между приливными деформациями земной коры и наблюдающимися вариациями интенсивности сейсмических шумов.

5. Проведены аналогии между приливной модуляцией сейсмического шума и корреляцией слабых землетрясений с приливами, включающие выявление общих свойств и соответствие одному физическому механизму.

Достоверность полученных результатов обеспечивается

- значительным объемом экспериментальных данных;
- согласованностью теоретических расчетов и лабораторных экспериментов с результатами статистической обработки натуральных данных;
- непротиворечивостью результатов в случае использования сейсмоприемников различной конструкции и проведения наблюдений ВСШ в различных пунктах.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии снижения риска опасных природных явлений (землетрясений), для снижения экономического ущерба и числа жертв среди населения. Мониторинг параметров сейсмических шумов на Камчатке ведется в оперативном режиме. Полученные новые данные о контролируемом процессе (отклике

разномасштабной сейсмичности на земные приливы) легли в основу разработанной прогностической методики. Методика прогноза сильных локальных землетрясений по вариациям отклика ВСШ на приливное воздействие внедрена в деятельность Камчатского филиала Единой геофизической службы РАН. Заключение о сейсмической обстановке, составленные по этой методике, еженедельно передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

Организация специализированных долговременных наблюдений высокочастотного сейсмического шума обеспечила получение рядов непрерывных данных, которые по длительности не имеют аналогов. Анализ продолжительных рядов ВСШ выявил ряд фундаментальных свойств отклика на приливное воздействие, к наиболее важным из которых следует отнести нестабильность эффекта модуляции, которая связывается с напряженно-деформированным состоянием среды.

Результаты лабораторного и математического моделирования, разработки физического механизма приливного отклика направлены на создание комплексной модели предвестниковых эффектов в сейсмических шумах и их связи с прогнозируемым явлением – сильным землетрясением. Эти модели существенно повышают обоснованность прогнозирования и выводят используемую методику из разряда эмпирических закономерностей.

Таким образом, объединяется решение фундаментальных проблем геофизики и прикладных задач, связанных с прогнозом землетрясений и оценкой сейсмической опасности.

Личный вклад автора

- Определение стратегии исследования явления воздействия приливов на сейсмический шум. Планирование и определение схемы исследований на всех этапах представляемой работы.
- Участие в организации и проведении наблюдений на всех пунктах ВСШ.
- Создание методики обработки и анализа ВСШ.
- Проведение обработки материалов, полученных в ходе регистрации ВСШ в природных условиях и лабораторных экспериментов.
- Интерпретация результатов натуральных и лабораторных наблюдений, а также вычислительных экспериментов.

Под непосредственным руководством автора созданы и в дальнейшем усовершенствованы алгоритмы и программы для обработки ВСШ и сейсмических данных, а также выполнены расчеты.

Соискателем было предложено для объяснения приливных эффектов в сейсмических шумах использовать результаты сотрудников ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) д.ф.-м.н. В.Ю. Зайцева и к.ф.-м.н. Л.А. Матвеева, показавших возможность существенного влияния очень слабых деформаций горных пород на поглощение акустических волн. В результате сотрудничества была создана диссипативная модель приливной мо-

дуляции сейсмических шумов. Вклады соавторов равнозначны.

Лабораторное моделирование приливного воздействия на сейсмичность проводилось при совместных работах с к.т.н. А.В. Патониным (Геофизическая обсерватория “Борок” Института физики Земли РАН). Диссертант определял схему экспериментов с учетом технических возможностей аппаратного комплекса “INOVA”. Эксперименты были проведены при непосредственном участии автора. Анализ данных и интерпретация результатов проведены диссертантом лично.

Диссертантом лично написано более двух третей объема публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Результаты, полученные на различных этапах исследований, были представлены на международных и российских научных конференциях и совещаниях, в том числе на Всероссийской научной конференции “Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков, к 10-летию РФФИ” (Москва–Иркутск, 2002), на Генеральных Ассамблеях IUGG (Саппоро, 2003; Мельбурн, 2011; Прага, 2015), на Генеральных Ассамблеях IASPEI (Сантьяго, 2005; Кейптаун, 2009), на Генеральных Ассамблеях ESC (Генуя, 2002; Потсдам, 2004; Женева, 2006; Москва, 2012), на Генеральных Ассамблеях ASC (Катманду, 2002; Ереван, 2004; Бангкок, 2006; Цукуба, 2008; Ханой, 2010; Улан-Батор, 2012; Макаати, 2014), на конференции “Проблемы сейсмичности Дальнего Востока” (Петропавловск-Камчатский, 1999), на конференциях, посвященных Дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 2003, 2004, 2005, 2008), на Международной конференции “Проблемы сейсмологии III тысячелетия” (Новосибирск, 2003), на Международной школе-семинаре “Физические основы прогнозирования разрушения горных пород” (Красноярск, 2001, Санкт-Петербург, 2010, Иркутск, 2013, Апатиты, 2016), на Международных конференциях “Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений” (Паратунка, Камчатка, 2004, 2007), на Международной конференции “Проблемы нелинейной волновой физики” (Санкт-Петербург–Нижний Новгород, 2005), на Международном симпозиуме “Проблемные вопросы островной и прибрежной сейсмологии” (Южно-Сахалинск, 2005), на Международной конференции “Активный геофизический мониторинг литосферы Земли” (Новосибирск, 2005), на конференции “Геофизический мониторинг Камчатки” (Петропавловск-Камчатский, 2005), на Международной сейсмологической школе (Петергоф, 2006; Нарочь, 2012, Чолпон-Ата, 2016), на конференциях “Геофизические чтения им. Федынского” (Москва, 2007, 2008), на Международном симпозиуме “Проблемы сеймобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири” (Южно-Сахалинск, 2007), на конференциях “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России” (Петропавловск-Камчатский, 2007, 2009, 2015), на сессиях Российского акустического общества (Нижний Новгород, 2007; Москва, 2008), на Международной конференции “Сейсмичность Северной Евразии” (Обнинск, 2008), на Международном симпозиуме по земным приливам (Йена, 2008), на Всероссийском совещании “Разломообразование и сейсмичность: тектонофизические концепции и следствия” (Иркутск,

2009), на Международной конференции “Деформация и разрушение материалов и наноматериалов” (Москва, 2009), на сессии EGU (Вена, 2010), на Международном симпозиуме “Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири” (Хабаровск, 2010).

Результаты докладывались на заседаниях Ученого совета Геофизической службы РАН, Ученого совета Камчатского филиала Геофизической службы РАН (2006-2016), секции геофизики и геодинамики Ученого совета Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (2015), на семинаре Физико-технического института им. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, 2002), на заседаниях Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и его Камчатского филиала.

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы изложены в 28 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, пяти приложений. Текст диссертации содержит 303 страницы текста, включая 100 рисунков, 12 таблиц. Список литературы содержит 289 наименований.

Благодарности. Соискатель бесконечно признателен автору открытия воздействия длиннопериодных деформационных процессов на сейсмические шумы, инициатору исследования этого явления на Камчатке, определившему научные интересы диссертанта на многие годы, научному руководителю кандидатской диссертации – члену-корреспонденту РАН Льву Николаевичу Рыкунову.

Работа была выполнена в Камчатском филиале Геофизической службы РАН (в настоящее время – Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”). Автор благодарен всем сотрудникам за помощь и поддержку. Особые слова благодарности хочется выразить к.т.н. В.Н. Чеброву и В.И. Синицыну, чьи заслуги в организации исследования сейсмических шумов на Камчатке не могут быть переоценены. Хочется отметить доброжелательное отношение и поддержку проводимых работ на их начальном этапе академика РАН Е.И. Гордеева, бывшего в то время начальником ОМСП Института вулканологии ДВО РАН (впоследствии КФ ГС РАН). Автор признателен за ценные обсуждения и полезные советы сотрудникам КФ ГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН к.ф.-м.н. И.Р. Абубакирову, д.ф.-м.н. А.В. Викулину, к.т.н. В.А. Гаврилову, д.ф.-м.н. А.А. Гусеву, к.ф.-м.н. Ю.А. Кугаенко, к.ф.-м.н. В.М. Павлову, за моральную поддержку д.г.-м.н. А.Ю. Озерову, за помощь и содействие в выполнении работ С.Е. Батаеву, О.Г. Волович, П.В. Воропаеву, В.В. Иванову, А.А. Коноваловой, Н.М. Кравченко, В.В. Марфелю, Е.В. Попову, В.А. Сергееву, А.А. Смирнову, А.В. Сумакову, Е.С. Федорову, а также В.Е. Баканову, С.И. Богатову, А.П. Молоткову, С.И. Плотникову.

С благодарностью автор отмечает, что регистрация сейсмических шумов в широкой полосе частот стала возможной благодаря к.ф.-м.н. А.С. Черепанцеву (ЮФУ,

г. Таганрог), предоставившему высокочувствительный сейсмометр своей разработки.

Большое спасибо д.ф.-м.н. В.Ю. Зайцеву и к.ф.-м.н. Л.А. Матвееву (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород), к.т.н. А.В. Пагонину (ГО "Борок" ИФЗ РАН), в сотрудничестве с которыми было проведено моделирование приливных эффектов.

Автор благодарен коллегам – члену-корреспонденту РАН А.В. Николаеву, члену-корреспонденту РАН Г.А. Соболеву, д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, д.ф.-м.н. Ю.О. Кузьмину, д.ф.-м.н. А.В. Пономареву (ИФЗ РАН), к.ф.-м.н. В.Б. Смирнову, В.В. Сергееву (физический факультет МГУ) чьими советами, консультациями, поддержкой пользовался в течение многих лет.

За помощь в решении всевозможных проблем, связанных с организацией и проведением регистрации сейсмических шумов за пределами Камчатки (на о. Шикотан и о. Хоккайдо) автор благодарит сотрудников ИМГиГ ДВО РАН и Сахалинского филиала ЕГС РАН – члена-корреспондента РАН Б.В. Левина, к.ф.-м.н. А.И. Иващенко (в настоящее время ИО РАН, г. Москва), д.ф.-м.н. В.М. Кайстренко, Ю.Н. Левина, А.А. Шишкина и Университета Хоккайдо (г. Саппоро, Япония) – профессора М. Касахара, профессора Х. Такахаши, М. Окаяма, М. Ичиянаги, М. Такада.

С благодарностью автор отмечает, что поддержка Российского фонда фундаментальных исследований в годы скудного бюджетного финансирования позволила сохранить это научное направление и получить основную часть представляемых результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность и научная новизна темы, определяются цель и решаемые задачи, формулируются положения, выносимые на защиту, отмечается практическая значимость и обосновывается достоверность полученных результатов исследования.

Глава 1. Отклик геосреды на приливное воздействие (обзор состояния исследований)

В Главе показаны современные взгляды на изучаемую проблему и история формирования представлений о приливной модуляции единого сейсмического процесса. В разделе 1.1 вводится понятие высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) и обсуждаются его источники. Эндогенная компонента сейсмического шума и ее информативность рассматриваются в разделе 1.2. Обзор основных публикаций о приливной модуляции сейсмических шумов (подтверждающих или опровергающих существование этого эффекта) приведен в разделе 1.3, а о приливном воздействии на сейсмичность – в разделе 1.4. В разделе 1.5 рассматривается реакция акустической эмиссии на периодическое нагружение образцов в контролируемых лабораторных условиях. В Заключении к Главе представлена логика построения диссертационной работы, определяемая нерешенными проблемами, показанными в обзоре.

1.1 Высокочастотные сейсмические шумы как поддиапазон сейсмических шумов.

Сейсмические шумы представляют собой достаточно широкий класс колебательных

процессов. В соответствии с их частотным диапазоном можно выделить низкочастотные микросейсмы (с периодом $T = 1 - 100$ с и более), высокочастотные сейсмические (с частотой $f = 10 - 1\ 000$ Гц) и сейсмоакустические (с частотой $f > 1\ 000$ Гц) шумы. В данной работе под **высокочастотным сейсмическим шумом (ВСШ)** понимаются сейсмические шумы в диапазоне первых десятков Гц.

Учитывая, что ВСШ рассматривались на начальном этапе их исследования как помеха при проведении традиционных сейсмологических работ, в основном их изучение было ориентировано на подавление такой помехи и исключение влияния шума на полезный сейсмический сигнал. К общим результатам многочисленных исследований можно отнести следующие свойства ВСШ: уменьшение спектральной плотности шумов с увеличением частоты (в среднем обратно пропорционально f^2); локальный максимум в диапазоне $2 - 3$ Гц; существование шумов с низким уровнем ($\sim 10^{-9}$ м, на несколько порядков ниже промышленных шумов), без источников, связанных с деятельностью человека, и наблюдаемых при специальном выборе места и времени регистрации. Пространственные региональные вариации уровня таких сигналов достигают ~ 40 дБ, что связывается с различными геологическими условиями. Кроме этого отмечены их временные вариации. Обычно ВСШ связывают с деятельностью человека. Кроме этого ВСШ генерируется природными факторами (ветром, в частности). Успешным уходом от ветровой помехи является регистрация в скважинах.

Однако даже в условиях, когда упомянутые источники шума отсутствуют, существует ВСШ, называемый региональным ВСШ. Он рассматривался еще в конце 1950-х – начале 1960-х годов (Л.П. Винник, К.К. Запольский, Н.М. Пручкина, J.N. Brune, J. Oliver). Можно было предположить эндогенный характер регионального ВСШ, но такая модель до середины 70-х годов XX века не рассматривалась: источники шума представлялись находящимися на земной поверхности, хотя предпосылки к изучению эндогенного ВСШ существовали, что следует из цитаты Г.А. Гамбурцева, Е.И. Гальперина: “не исключена возможность того, что регистрируемые микросейсмы имеют глубинное происхождение. Это явление представляет самостоятельный интерес и заслуживает проверки специальными наблюдениями”.

1.2 Геофизическая среда и информативность поля сейсмической эмиссии. Сейсмический шум представляет собой суперпозицию экзогенного шума и эндогенного. И если источники экзогенного шума, как правило, находятся на поверхности Земли, то эндогенный шум, или сейсмическая эмиссия (СЭ), отражает активность внутренних объемов среды. Факторы, влияющие на сейсмическую эмиссию, могут быть как внутренними (напряженно-деформированное состояние среды, гидротермальная активность и т.д.), так и внешними (например, гравитационное воздействие Луны и Солнца или длиннопериодные сейсмические волны от далеких землетрясений).

Одним из следствий экспериментального обнаружения сейсмической эмиссии стала возможность использования подходов, рассматривающих микросейсмические шумы как самостоятельное информационное поле, содержащее данные о свойствах

среды и протекающих в ней процессах.

Наличие в шумовом поле компоненты, не связанной с поверхностными эффектами, было продемонстрировано В.В. Жадиным, Е.И. Гордеевым, Л.Н. Рыкуновым в работах начала 1970-х годов, где при изучении спектра волны от далекого землетрясения была обнаружена высокочастотная компонента, обязанная своим происхождением активизации локальных шумовых источников под действием интенсивной длиннопериодной волны, что предполагает наличие в коре источников ВСШ, чувствительных к внешним воздействиям. По видимому, именно с этих работ началось исследование связи СЭ с длиннопериодными деформационными процессами, развитие Л.Н. Рыкуновым, О.Б. Хаврошкиным и В.В. Цыплаковым.

Изучению самостоятельной информативности сейсмических шумов посвящено большое количество работ, среди авторов которых были Л.П. Винник, Л.Н. Рыкунов, Г.А. Соболев, В.Б. Смирнов, П.А. Троицкий, А.С. Черепанцев, Б.М. Шубик и другие, развивавшие это направление.

Учитывая, что наиболее высокой эмиссионной активностью, как отмечено В.В. Адушкиным и А.А. Спиваком, обладают зоны разломов, контакты блоков земной коры, области аномальной трещиноватости и раздробленности, сейсмическая эмиссия становится перспективным инструментом для мониторинга проблемных геобъектов.

1.3 Исследования приливного воздействия на высокочастотный сейсмический шум. “Краеугольным камнем” в изучении связи ВСШ и земных приливов является открытие явления модуляции сейсмических шумов Земли длиннопериодными деформирующими процессами, сделанное Л.Н. Рыкуновым, О.Б. Хаврошкиным и В.В. Цыплаковым в 1983 г.

В последующие за открытием годы исследования этого эффекта были проведены А.С. Беляковым, Б.П. Дьяконовым, Б.С. Каррыевым, А.В. Николаевым, Р.Р. Сероглазовым, А.К. Трояновым и др. Отмечены суточные и полусуточные периодичности в уровне СЭ. Показано отличия интенсивности СЭ при сизигийном и квадратурном приливах. К сожалению, как правило, продолжительность регистрации в этих работах невелика, и зачастую интересные результаты не подкреплены надежными статистическими оценками.

С самого начала этого направления решается задача о механизме излучения ВСШ. Однако, моделирование не прошло дальше феноменологического уровня.

Результаты, подтверждающие модуляцию сейсмического шума, не были восприняты научным сообществом однозначно. Опубликованы работы Г.И. Аксеновича, Л.П. Винника, Е.И. Гальперина, Н.В. Петерсен, А.В. Ситникова, критикующих вышеупомянутые выводы, либо утверждающих альтернативный вариант – отсутствие какой-либо модуляции шума деформационными процессами на основе независимых наблюдений. Наиболее уязвимыми местами работ о модуляции с точки зрения критиков являются ограниченное представление первичного материала и утверждение о наличии причинно-следственной связи, исходя лишь из коррелированности процессов.

Активная публичная дискуссия на тему модуляции завершилась в 1990 г. публикацией двух статей в одном номере журнала “Physics of the Earth and Planetary Interiors”, где участники полемики изложили свою позицию еще раз.

Одна из основных причин, давших основания для отрицания приливной модуляции, – короткие ряды наблюдений, не давшие возможность получить более детальные и статистически достоверные оценки. Поэтому по инициативе Л.Н. Рыкунова и были организованы наблюдения ВСШ на Камчатке, ориентированные на продолжительную регистрацию (Подробнее см. Главу 2).

На Камчатке исследования приливного воздействия на сейсмические шумы начали проводиться в начале 90-х годов. Режимные долговременные наблюдения ВСШ, организованные в максимально удаленном от антропогенных помех месте, позволили получить статистически обоснованные результаты¹. В частности, были получены различия уровня шума в четырех фазах прилива, выделены вариации уровня ВСШ с периодами основных приливных волн, показаны характерные двухнедельные цуги во временном ходе ВСШ, что подтверждает амплитудную модуляцию шумов приливами. Обнаруженное свойство нестабильности отклика ВСШ на приливное воздействие также, вероятно, является одной из основных причин, по которым не всем исследователям удавалось выявить приливные гармоники ВСШ при анализе непродолжительных рядов наблюдений, что и привело к описанной выше дискуссии. Результаты об изменении связи ВСШ с приливами, обусловленные напряженным состоянием среды, определили дальнейшее развитие этого научного направления на Камчатке, представленное в диссертации.

Несмотря на неоднозначное отношение научной общественности к проблеме приливного воздействия на ВСШ, исследования в этом направлении развивались. Вероятно, первый обзор работ, связанных с модуляцией сейсмических шумов, был сделан в 1999 г. Л.Н. Рыкуновым, О.Б. Хаврошкиным, В.В. Цыплаковым. Как следует из обзора, в последней четверти XX века исследования приливного воздействия на шумы проводились на Урале (группа Б.П. Дьяконова и А.К. Троянова), в Институте физики Земли РАН (член-корреспондент РАН А.В. Николаев, А.С. Беляков с коллегами) и на Камчатке. Согласно более поздним публикациям работа этих коллективов продолжается и в настоящее время.

Отдельно следует упомянуть разносторонние исследования сейсмических шумов, проведенные в Институте динамики геосфер РАН В.В. Адушкиным, А.А. Спиваком, С.Б. Кишкиной, В.Г. Спунгиным, Р.Р. Сероглазовым: эксперименты по обнаружению модуляции, комплексный анализ шумов совместно с другими геофизическими полями, моделирование процессов. Большой интерес, в том числе и с точки зрения организации наблюдений, вызывает вывод А.А. Спивака и С.Б. Кишкиной о том, что эффекты мо-

¹ Салтыков В.А. Воздействие геофизических полей на высокочастотный сейсмический шум – Диссерт. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, ИВ ДВО РАН, 1993. 147 с.

дуляции проявляются на отдельных резонансных частотах сейсмического шума, в то время как для сигнала в целом подтвердить модуляцию не удалось. Возможно, что это еще одна причина неустойчивости модуляционных эффектов во многих выше цитированных работах.

Исследования связи ВСШ с приливами проводились на Камчатке также в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. В работах, выполненных под руководством В.А. Гаврилова, совершенно справедливо указано преимущество регистрации сейсмических шумов в глубоких скважинах, однако такие наблюдения на глубине около 1 000 м в скважине Г-1 в черте г. Петропавловска-Камчатского не смогли продемонстрировать приливные эффекты. Между тем, регистрация шумов на глубине 730 м в скважине Р-2, расположенной в 20 км от г. Петропавловска-Камчатского, то есть в удалении от источников антропогенных шумов показала с хорошей статистической значимостью наличие в огибающей шумов периодических компонент с периодами приливных волн $O_1 - 25.82$ ч и $M_2 - 12.42$ ч.

Таким образом, с момента обнаружения приливной модуляции ВСШ отношение к этому эффекту было неоднозначным. Выводы исследователей противоречивы и не всегда обоснованы. Следовательно, для подтверждения реального существования приливной модуляции требуются дополнительные исследования, ориентированные (1) на получение статистически обоснованных оценок, (2) на определение условий проявления модуляции и (3) на выяснение ее физического механизма.

1.4 Приливное воздействие на сейсмичность. Учитывая, что ВСШ – это один из масштабных уровней единого сейсмического процесса, следует рассмотреть и проблемы, связанные с изучением воздействия приливов на сейсмичность масштаба землетрясений. Исходя из принципа самоподобия, закономерности приливного отклика для этих разномасштабных сейсмических процессов должны быть схожи.

Вопрос о воздействии земных приливов на сейсмичность имеет достаточно долгую историю, и многие научные работы посвящены этой проблеме. Дискуссия о наличии связи землетрясений с земными приливами наметилась уже в конце XIX в., однако, и до настоящего времени получаемые результаты неоднозначны.

С.В. Гольдин, В.Г. Гитис, В.А. Николаев, В.Ю. Тимофеев, Е.Ф. Юрков, Е. Cochran, Т. Heaton, W. Perry, А. Polumbo, М. Tolstoy, Н. Tsuruoka, R. Weems, W. Wilcock (список может быть продолжен) сделали положительные выводы о приливном воздействии на сейсмичность, но многие исследователи (например, L. Knopoff, J. Simpson, S. Shlien, P. Rydelek, J. Vidale) не разделяют эту точку зрения. Примечательно, что ряд ученых (среди них Ю.С. Тюпкин, S. Aoki, М. Ohtake, Н. Sato, S. Tanaka) допускают, что приливные эффекты в сейсмичности непостоянны во времени, в отличие от параметров самих приливов. На этой нестабильности строится и известная методика прогноза землетрясений LURR (автор – Х.С. Yin).

В целом, конечно, тематика приливных эффектов в сейсмичности масштаба землетрясений проработана гораздо лучше, чем на масштабе сейсмических шумов. В рам-

как диссертационной работы, учитывая единую природу сейсмической эмиссии и землетрясений, актуально показать схожесть проявления приливных эффектов на различных масштабах сейсмичности.

1.5 Лабораторные эксперименты по моделированию приливного воздействия на сейсмический процесс. Приливное воздействие на сейсмический процесс можно моделировать в контролируемых лабораторных условиях. При этом аналогом потока сейсмических событий выступает АЭ, а приливы моделируются периодическим воздействием.

Триггерное влияние вибраций на сейсмический режим моделировалось и исследовалось М.А. Садовским, Г.А. Соболевым, Л.М. Богомоловым, К.А. Мирзоевым, В.С. Куксенко, А.В. Пономаревым, В.Б. Смирновым, Н.Г. Томилиным и др. В ходе экспериментов было показано, что вибрационные воздействия влияют на кинетику микротрещин в гетерогенных средах, что отмечается как изменение активности АЭ эмиссии под действием вибрационных полей. Были обнаружены нелинейные эффекты такого влияния: временная задержка эмиссионной реакции среды и последствие. Обнаружено, что при дилатансионном деформировании горных пород, проявляется высокая чувствительность неупругих процессов к действию слабых вибраций.

В аспекте выполняемого диссертационного исследования наиболее интересны результаты лабораторных экспериментов по исследованию периодического нагружения образца на стадии предразрушения, так как предполагается, что отклик ВСШ на приливное воздействие наиболее ярко проявляется в период подготовки землетрясений.

Заключение к Главе 1. Приведенные материалы демонстрируют широту спектра интересов в исследовании как непосредственно поля ВСШ, так и приливного воздействия на различные сейсмические процессы. Однако, многие вопросы требуют дополнительных исследований, в частности, это касается физического обоснования полученных эффектов и получения более качественных экспериментальных данных. Особый интерес представляет изучение модуляции сейсмической эмиссии в сейсмически активном регионе, где ожидаются изменения напряженно-деформированного состояния среды, связываемые с подготовкой и реализацией сильных землетрясений. Остается нерешенным вопрос о моделях приливной модуляции, дающих объяснение процесса не только на качественном уровне, но и количественно (физический механизм).

Все это и определило задачи представляемой работы и, соответственно, структуру диссертации (Рис. 1):

1. Организация пунктов регистрации ВСШ и проведение многолетних режимных наблюдений в сейсмически активном регионе в пунктах, максимально удаленных от источников антропогенных помех, с целью обеспечения данными наблюдений в качестве информационной основы дальнейших исследований (Глава 2);
2. Исследование региональных особенностей приливного отклика ВСШ (Глава 3);
3. Изучение связи параметров приливного отклика ВСШ с изменениями напряженно-деформированного состояния среды, появляющимися при подготовке и реализации

сильных локальных землетрясений (Глава 3);

4. Моделирование эффекта модуляции ВСШ приливным воздействием. Для решения этой задачи отдельно рассмотрены:

– приливные эффекты, обусловленные нелинейностью свойств гетерогенных сред в процессе распространения через них микросейсмического излучения (физический механизм) (Глава 4);

– действие приливов непосредственно на активность источников сейсмической эмиссии (лабораторное моделирование); влияние земных приливов на сейсмичность имитируется в контролируемых лабораторных условиях при нагружении образцов горных пород (Глава 5);

5. Решение проблемы дальнего действия зоны подготовки землетрясения на область сбора ВСШ (математическое моделирование) (Глава 3);

6. Сопоставление особенностей приливного отклика сейсмичности на различных энергетических уровнях: ВСШ и слабые землетрясения (Глава 6).

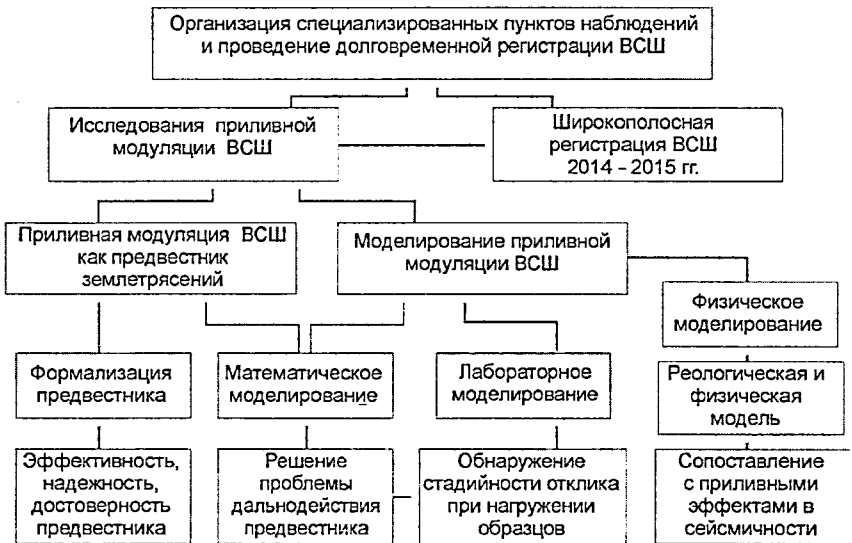


Рисунок 1 – Схематическое представление структуры диссертации, отражающее принципиальные направления исследования приливной модуляции ВСШ и основные результаты.

Глава 2. Обеспечение информационной основы исследований ВСШ на базе долговременных стационарных наблюдений

Глава обобщает опыт организации долговременных наблюдений за ВСШ в четырех пунктах вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги. Эти пункты представлены в разделе 2.1. В разделе 2.2. описан используемый датчик и даны его технические характеристики. Раздел 2.3 посвящен аппаратно-программным комплексам каждого из пунктов регистрации ВСШ. Особенности временного хода ВСШ,

обусловленные экзогенными факторами, показаны в разделе 2.4.

В пределах Курило-Камчатской островной дуги была организована регистрация сейсмических шумов на базе узкополосных высокочувствительных сейсмометров резонансного типа в четырех удаленных от источников антропогенной активности пунктах наблюдений: “Начики” и “Карымшина” (южная часть полуострова Камчатка), “Эримо” (остров Хоккайдо, Япония) и “Шикотан” (Курильские острова), – находящихся в различных геолого-тектонических условиях (Рис. 2).



Рисунок 2 – Схема расположения пунктов регистрации ВСШ.

Начавшаяся в 1987 г. регистрация ВСШ в пункте “Начики” позволила обнаружить ряд эффектов и очертить круг возможных задач и проблем. Однако исследование шумов в одной точке, по данным единственной станции, носит односторонний характер. Именно развитие наблюдательной сети, проведение долговременной регистрации в нескольких точках и последующий комплексный анализ создали базу для ответа на ряд вопросов, которые появляются при интерпретации данных. В первую очередь это касается достоверности и устойчивости выявления достаточно тонких эффектов, таких как приливная модуляция ВСШ и связь ВСШ с различными геофизическими процессами, в том числе с изменением напряженного состояния среды в процессе подготовки сильных локальных землетрясений (см. Главу 3). И принципиальным этапом, предвещающим этот анализ, стала оценка влияния антропогенного и метеорологического факторов на сейсмический шум. Важным аспектом проведенной работы представляется создание унифицированной системы регистрации ВСШ для различных пунктов, что позволило проводить обработку данных по единой методике и сопоставлять полученные результаты.

Заключение к Главе 2. В течение 1987–2015 гг. были проведены режимные наблюдения ВСШ, не имеющие аналогов в сейсмологической практике. Полученные данные служат информационной основой для дальнейшего получения новых знаний об этом процессе. В настоящее время эти исследования могут рассматриваться как мониторинг

ВСШ, в который входят ведение непрерывных долговременных наблюдений, обработка и анализ данных, еженедельная подготовка на их основе прогностических заключений о сейсмической обстановке для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Основные результаты Главы 2 опубликованы в журнальных статьях [1, 2, 3, 8, 9, 11, 13, 16, 17, 19, 20, 24].

Глава 3. Приливная модуляция сейсмических шумов и ее проявления при долговременных наблюдениях

В данной главе собраны результаты многолетних работ по исследованию приливных компонент ВСШ с использованием натуральных наблюдений.

В разделе 3.1 описано выделение приливных гармоник из рядов ВСШ. В разделе 3.2 обсуждается проблема нестабильности приливного отклика ВСШ во времени.

Основная часть главы посвящена мониторингу приливной компоненты ВСШ в контексте связи с напряженно-деформированным состоянием среды и исследования предвестников сильных локальных землетрясений (раздел 3.3). Представлен экспериментально обнаруженный эффект стабилизации фазы приливной компоненты ВСШ при подготовке сильного землетрясения, на основе которого была предложена методика прогноза сильных землетрясений. Обобщен многолетний опыт применения этой методики на Камчатке, а также приводятся аналогичные результаты для о. Шикотан и о. Хоккайдо. Отдельно обсуждаются воспроизводимость выявленного эффекта стабилизации фазы, экспериментально обнаруженная связь значения фазы с местоположением готовящегося землетрясения, эмпирическая зависимость порога “чувствительности” эффекта стабилизации к эпицентральному расстоянию и магнитуде готовящегося землетрясения. Проведена оценка возможности использования обсуждаемого эффекта в качестве предвестника землетрясения: получены значения таких параметров предвестника как надежность, достоверность, эффективность.

В разделе 3.4 приводятся результаты численных экспериментов, направленных на разработку обоснования дальнодействия предвестникового эффекта на расстояниях, в несколько раз превышающих размеры очагов этих землетрясений. Представлена концептуальная модель влияния удаленного очага землетрясения на параметры ВСШ.

Представлены результаты обработки данных регистрации ВСШ широкополосной аппаратурой (раздел 3.5) в сопоставлении с узкополосной.

3.1 Выделение приливных гармоник из рядов ВСШ. Гравитационное воздействие Луны и Солнца рассматривается как естественный процесс, имеющий стабильные во времени параметры. Эта стационарность позволяет использовать земные приливы как природный эталон воздействия (калибратор) при изучении вариаций геофизических полей, связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния среды.

При исследовании отклика ВСШ на приливное воздействие приливные волны гравитационного потенциала O_1 , K_1 , P_1 , Q_1 , M_2 , S_2 , N_2 рассматриваются отдельно. Вариации огибающей ВСШ с периодами основных приливных волн выделены из рядов

наблюдений по схеме Бью-Балло (метод наложения эпох). Указанный способ позволил выделять скрытые периодичности полезного сигнала в условиях действия сильных помех, когда применение гармонического анализа оказывается недостаточно эффективным. Глубина модуляции составляет первые проценты.

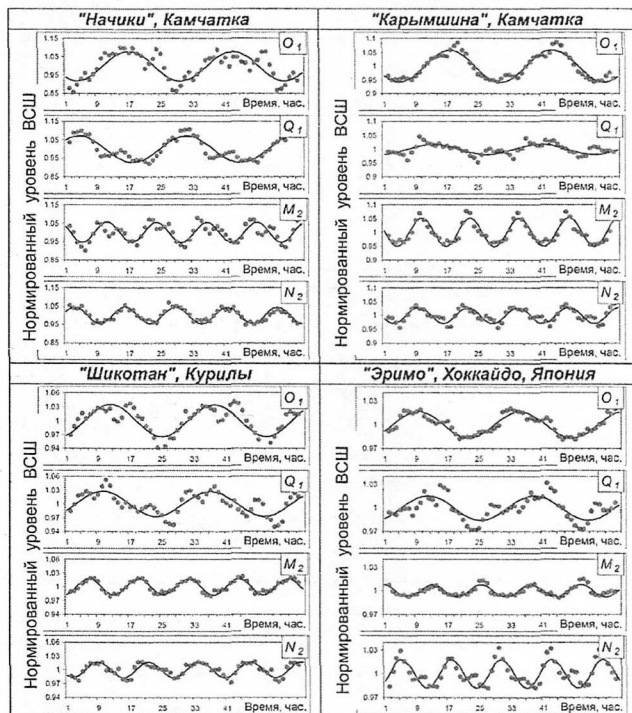


Рисунок 3 – Вариации уровня ВСШ с периодами, соответствующими приливным гармоникам O_1 , Q_1 , M_2 и N_2 , на четырех пунктах регистрации ВСШ – “Начики”, “Карымшина”, “Шикотан” и “Эримо”. Сплошная линия – аппроксимация представленных точек гармоникой с периодом соответствующей приливной волны по методу наименьших квадратов.

Примеры приливных гармоник, выделенных из записей ВСШ, полученных на станциях “Начики”, “Карымшина”, “Эримо” и “Шикотан”, представлены на рис. 3. Компонента огибающей ВСШ с периодом волны O_1 , ($T = 25.8$ час.) имеет наибольшую помехозащищенность (в условиях существования в составе сигнала экзогенных компонент с периодом $T = 24.00$ час., являющихся помехами в контексте целей работы) и относительно большую амплитуду.

3.2 Эффекты нестабильности приливного отклика ВСШ. Обнаружено, что отклик ВСШ на приливное воздействие не носит стабильный во времени характер, в то время как сами земные приливы имеют постоянные во времени параметры (амплитуды, периоды и фазы набора приливных волн).

Анализ всего временного ряда позволяет утверждать, что в среднем приливное воздействие отсутствует, так как при когерентном суммировании всего ряда огибающей ВСШ с периодом волн O_1 , M_2 и N_2 периодическая компонента не выявляется. Однако, при меньших временных интервалах (1 – 6 месяцев) периодические компоненты

выявляются статистически значимо.

Следует отметить изменчивость (*нестабильность*) приливного отклика при долговременных наблюдениях:

1. компоненты с периодами волн приливного потенциала выявляются не всегда, участки существования приливной компоненты сменяются участками ее отсутствия;

2. величина фазового сдвига между компонентой ВСШ и компонентой приливного потенциала меняется для различных участков данных.

При выявлении приливной компоненты ВСШ в целях мониторинга состояния среды следует иметь в виду, что:

1) Рассмотрение приливной компоненты ВСШ в большом временном окне может не привести к положительным результатам в силу неустойчивости отклика ВСШ на земные приливы;

2) Ширина временного окна должна позволять разделение близких по частоте периодических компонент. Например, для разделения волн K_1 (период $T=23.93$ час.) и O_1 ($T=25.82$ час.) минимальная ширина временного окна составляет 2 недели;

3) Так как не предполагается контроль антропогенного воздействия, и соответствующая коррекция данных не представляется возможной, то следует иметь в виду, что спектральные линии с периодами 24.0 час. (а также 12.0 час.) будут соответствовать общему действию приливного и антропогенного воздействия. Это налагает большие ограничения на использование приливных волн P_1 , K_1 и S_2 , которые имеют периоды 24.07, 23.93 и 12.00 час. Из основных волн остаются волны O_1 (период $T=25.82$ час.), Q_1 ($T=26.87$ час.), M_2 ($T=12.42$ час.), N_2 ($T=12.66$ час.).

3.3 Мониторинг приливной компоненты ВСШ. С конца 80-х годов XX века на Камчатке ведутся исследования ВСШ в рамках фундаментальной проблемы сейсмологии, связанной с изучением возможности мониторинга напряженного состояния среды и подготовки сильных землетрясений по изменению параметров геофизических полей, к которым следует отнести и поле ВСШ.

Под мониторингом здесь понимается комплекс работ, позволяющий выявить тенденции в изменениях контролируемой системы и включающий ведение наблюдений, анализ и прогноз. Информационной основой ведения мониторинга ВСШ на Камчатке являются результаты долговременных наблюдений в двух пунктах, достаточно удаленных от районов антропогенной активности.

В 90-х годах XX века на основе изучения особенностей ВСШ был предложен способ контроля напряженного состояния среды по изменению параметров его отклика на приливы. В качестве информационного параметра был выбран фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между приливной волной O_1 в гравитационном потенциале и периодической компонентой вгибающей ВСШ, имеющей период этой же волны – 25.82 час.

3.3.1 Стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ при подготовке сильного землетрясения. В ходе исследований неустойчивости отклика ВСШ на приливное воздействие было обнаружено важное свойство: перед сильными региональными земле-

трясениями упорядочивается отклик ВСШ на приливное воздействие (Рис. 4), что проявляется как наблюдающаяся стабилизация фазового сдвига $\Delta\varphi$ между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом (далее – стабилизация $\Delta\varphi$). На этих интервалах времени отклик ВСШ на приливное воздействие может рассматриваться как устойчивый процесс.

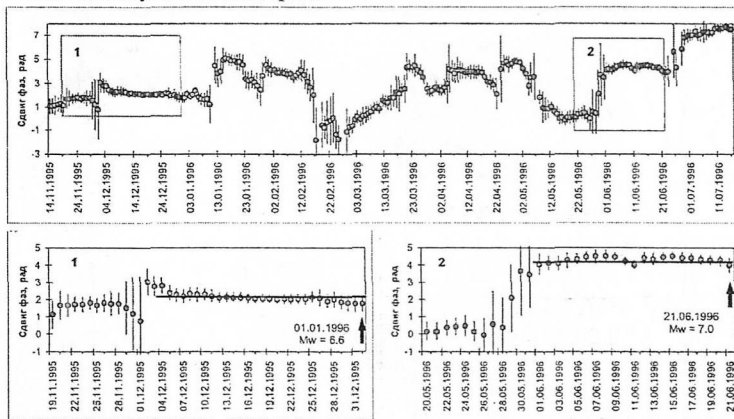


Рисунок 4 – Примеры временного хода параметра $\Delta\varphi$ на станции “Начики” и синхронизации выделенной из огибающей ВСШ приливной компоненты с волной O_1 гравитационного потенциала перед сильными землетрясениями (участки 1,2).

Это свойство легло в основу гипотезы о связи вариаций фазы приливной компоненты ВСШ с геодинамическими процессами в регионе. Синхронизация ВСШ с внешним приливным воздействием, проявляющаяся в виде стабилизации $\Delta\varphi$, рассматривается как прогностический признак и является новым, ранее не обнаруженным предвестником землетрясений.

Определение нижнего порога магнитуды ожидаемых землетрясений как функции эпицентрального расстояния. Обобщение данных многолетних работ по выявлению предвестников по результатам мониторинга ВСШ позволило определить зависимость, связывающую пространственные и энергетические характеристики прогнозируемого события для Камчатки.

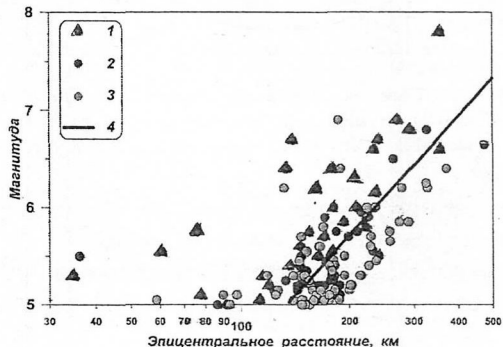


Рисунок 5 – Эмпирическая зависимость нижнего порога магнитуды прогнозируемого события от эпицентрального расстояния по данным станции “Начики”.

1 – землетрясения, произошедшие на участке стабилизации фазы $\Delta\varphi$; 2 – землетрясения, произошедшие в течение 2 недель после завершения участка стабилизации фазы; 3 – землетрясения, перед которыми предвестник по рассматриваемой методике выделен не был; 4 – предлагаемая зависимость “магнитуда-расстояние”.

Были рассмотрены все участки стабилизации $\Delta\varphi$, выявленные при анализе данных цифровой регистрации ВСШ в течение 1996 – 2013 гг. и имеющие продолжительность более 3 недель. Все землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$, произошедшие за это время разделены по трем категориям (Рис. 5):

- на момент землетрясения длительность стабилизации $\Delta\varphi$ превысила 3 недели;
- землетрясение произошло не позднее 2 недель после завершения стабилизации;
- землетрясению не ставится в соответствие предвестник, то есть либо 1) землетрясение произошло на участке стабилизации фазы $\Delta\varphi$, когда ее длительность не достигла 3 недель, либо 2) землетрясение произошло более чем через 2 недели после ближайшей по времени стабилизации фазы.

Определена граница, определяющая минимальное значение магнитуды M ожидаемого землетрясения при эпицентральной дистанции Δ : $M = -3.64 + 4.06 \cdot \lg \Delta$ ($[\Delta] = \text{км}$), которая использована во всех последующих расчетах.

Оценка эффективности предвестника. Для анализа эффективности рассматриваемого предвестника использован каталог землетрясений КФ ГС РАН за 1996 – 2013 гг. с глубиной до 300 км, с учетом определенной выше зависимости.

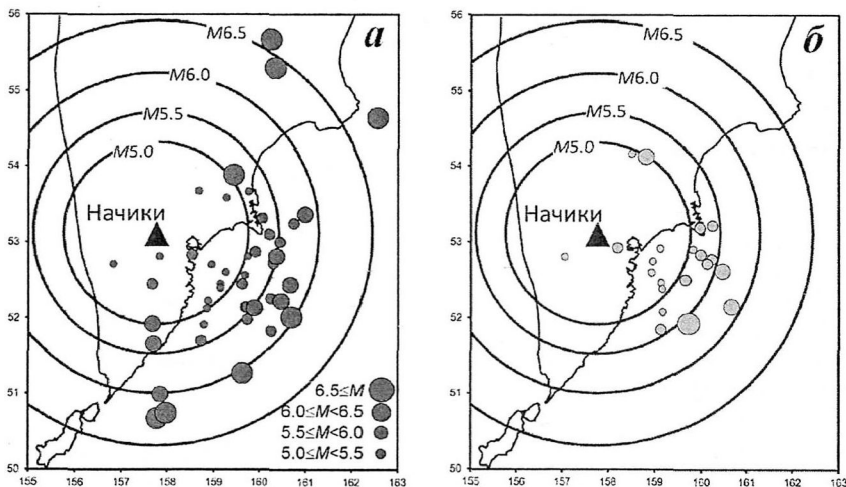


Рисунок 6 – Эпицентры землетрясений 1996 – 2013 гг., связываемых с предвестником (а), и землетрясений, перед которыми предвестник по рассматриваемой методике выделен не был (б). Окружности отмечают нижний порог чувствительности предвестника по магнитуде M в зависимости от эпицентрального расстояния Δ .

Полученная выборка (Рис. 6) состоит из 68 землетрясений (из них 46 – имеют предвестник), что позволяет при анализе использовать статистический подход.

Надежность предвестника R определена как отношение числа землетрясений $N(E_A)$, для которых было выделен предвестник, к числу всех землетрясений $N(E)$:

$R=N(E_A)/N(E)$. Надежность предвестника существенно выше для землетрясений больших магнитуд, чем меньших: Для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$ надежность R составила 0,9, для $M \geq 6.0$ $R \approx 0.8$, а для $M \geq 5.0$ — $R \approx 0.7$.

Определена *достоверность предвестника* V как отношение числа предвестниковых аномалий $N(A_E)$ к общему числу выделенных аномалий $N(A)$: $V=N(A_E)/N(A)$. $\approx 50\%$ аномалий могут рассматриваться как реализовавшийся предвестник землетрясения с $M \geq 5.0$, и лишь $\approx 20\%$ — землетрясения с $M \geq 6.0$.

Нередки случаи, когда одному предвестнику могут быть поставлены в соответствие несколько землетрясений (группа), и их необходимо учитывать при решении вопроса о реализации прогноза и оценке времени тревоги. В этом случае используется следующий алгоритм: 1) прогноз считается реализовавшимся первым землетрясением соответствующего прогнозу магнитудного интервала, 2) тревога снимается, 3) следующее (следующие) землетрясения, которые могли бы формально соответствовать этой же предвестниковой аномалии, объявляются пропущенными (ситуация, квалифицируемая как “пропуск цели”).

Важным параметром оценки предвестниковых аномалий является *эффективность*, которая позволяет сравнить создаваемую методикой со случайным угадыванием. Для оценки эффективности рассматриваемого предвестника были использованы два известных подхода — А.А. Гусева и Г.М. Молчана.

Эффективность по методике А.А. Гусева J_G определяется для конкретной пространственной области и определенного энергетического диапазона землетрясений по

формуле $J_G = \frac{N_+ / T_{тревоги}}{N / T}$, где T — общее время мониторинга сейсмической обстановки

по рассматриваемой методике; N_+ — количество землетрясений, соответствующих успешно реализованному предвестнику за время T ; N — общее количество землетрясений (имеющих пространственно-энергетические параметры, аналогичные прогнозируемым), произошедших за время T ; $T_{тревоги}$ — общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемой методике в течение времени мониторинга T). Эффективность J_G является отношением условной (во время тревоги) вероятности землетрясения к их средней вероятности. В отсутствие связи “землетрясение — предвестник”, то есть при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Для рассматриваемых данных эффективность J_G с учетом величины стандартного отклонения не меняется при изменении магнитудного порога прогнозируемых землетрясений и составляет $\approx 2 - 3$. При этом статистическая значимость α демонстрирует очень низкую вероятность случайного получения таких значений в отсутствие связи землетрясений с обсуждаемым предвестником (от $2 \cdot 10^{-8}$ при $M \geq 5.0$ до $5 \cdot 10^{-4}$ при $M \geq 6.5$).

Эффективность по методике Г.М. Молчана. На рис. 7 представлены диаграммы Молчана для четырех порогов магнитуды. Абсцисса точки определяется как мера тре-

воги $\tau = T_{\text{тревоги}}/T$, а ордината – как доля пропусков цели $\nu = 1 - N_+/N$. Диагональ диаграммы $\tau + \nu = 1$, соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали можно построить доверительный интервал с заданной значимостью α . Для всех четырех порогов экспериментальные точки (τ, ν) лежат ниже доверительного интервала при $\alpha=0.01$, что интерпретируется как высокая степень надежности выявленной связи аномалий с происходящими землетрясениями.

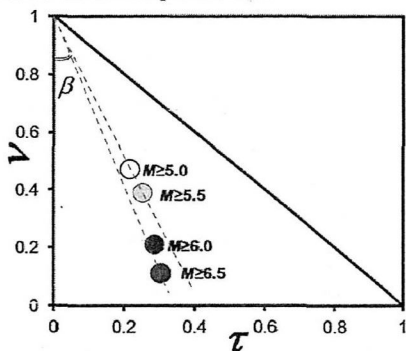


Рисунок 7 – Диаграмма Молчана для различных порогов магнитуды M .

Эффективность предвестника J_M определяется как $J_M = 1 - \nu - \tau$. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M = 1$. Отмечено, что для высокого порога магнитуд ($M \geq 6.5$) эффективность существенно (почти в 2 раза) выше, чем для низкого ($M \geq 5.0$), что, в основном, определяется изменением надежности предвестника.

Вероятность реализации предвестника оценена по следующему алгоритму:

1. Сделана проверка соответствия потока рассматриваемых землетрясений с магнитудой $M \geq -3.64 + 4.06 \cdot \lg \Delta$ пуассоновскому распределению.

2. Исходя из пуассоновского характера распределения землетрясений оценивается вероятность хотя бы одного землетрясения в течение заданного времени t : $p(n > 0) = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ – интенсивность пуассоновского потока.

3. По смыслу параметра эффективности J_G , ожидаемая вероятность появления хотя бы одного землетрясения за время t после идентификации предвестника будет равна $p_+(n > 0) = 1 - e^{-J_G \lambda t}$.

Учитывая, что при анализе обнаружены землетрясения, не имеющие рассматриваемого предвестника (“пропуск цели”), оценена вероятность землетрясения прогнозируемого класса в отсутствие предвестника. Основываясь на том, что за время мониторинга $T_- = T - T_{\text{тревоги}}$ в отсутствие предвестника произошло $N_- = N - N_+$ землетрясений: $p_-(n > 0) = 1 - e^{-N_- / T_-}$.

Пропорция между $p_+(n > 0)$ и $p_-(n > 0)$, назовем ее контрастностью C , показывает насколько увеличивается вероятность землетрясения при наличии предвестника по сравнению с ситуацией в отсутствие предвестника. В этом принципиальное отличие

контрастности от эффективности предвестника J_G , которая отражает сравнение со средней вероятностью, игнорируя существенное снижение вероятности землетрясения в отсутствие предвестника.

Характеристика прогностической методики дана в терминах общей прогностики:

Методика является *поисковой* и направлена на определение возможного положения явления (сильного регионального землетрясения) в будущем. Разрабатываемый прогноз рассматривается как *вероятностный*. *Объектом прогнозирования* являются региональные землетрясения в указанном диапазоне эпицентральных расстояний от станции регистрации ВСШ. При прогнозировании применяется *метод экстраполяции*: распространение выявленных закономерностей развития объекта прогнозирования на будущее в предположении, что выявленная закономерность, выступающая в качестве базы прогнозирования, сохраняется и в дальнейшем.

1. *Предвестник*: стабилизация фазового сдвига между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом продолжительностью 3 недели;

2. *Момент подачи тревоги* (прогнозного заключения): достижение стабилизацией продолжительности $(t_{тр} - t_0) = 3$ недели;

3. *Параметры ожидаемого землетрясения*: прогнозируются землетрясения с магнитудой $M \geq M_0 = 5.0$ на глубине до 300 км. Предельное эпицентральное расстояние Δ связано с ожидаемой магнитудой M и определяется соотношением $\lg \Delta = (M + 3.64) / 4.06$;

4. *Период упреждения прогноза* (промежуток времени, на который разрабатывается прогноз): прогноз дается первоначально на 2 недели, с возможной пролонгацией.

5. *Снятие тревоги при отсутствии ожидаемого землетрясения* (ложная тревога): тревога снимается через 2 недели после окончания стабилизации фазы;

6. *Успешный (оправдавшийся) прогноз*: землетрясение, соответствующее п.3 и произошедшее во временном интервале, объявленном тревогой;

7. *Снятие тревоги после оправдавшегося прогноза*: произошедшее землетрясение с магнитудой M_1 , удовлетворяющее условиям п. 3, снимает прогноз землетрясения с магнитудой в диапазоне $[M_0; M_1]$ досрочно. Время тревоги составляет $(t_{землетрясения} - t_{тр})$. Прогноз относительно $M \geq (M_1 + 0.1)$ остается в силе с соблюдением условий п.3 (диапазон глубин и соотношение «эпицентральное расстояние – магнитуда») и п. 5 (снятие тревоги).

8. *Вероятность реализации предвестника*: прогноз носит вероятностный характер, определяемый номограммой. Вероятность пропуска цели определяется соответствующей номограммой.

3.3.2 *Связь значения стабилизированной фазы с местоположением готовящегося землетрясения*. Рассмотрено распределение землетрясений по фазам $\Delta\phi$ для выборки из 29 субдукционных поверхностных землетрясений, предварившихся стабилизацией $\Delta\phi$.

Анализ площадного распределения фазы $\Delta\phi$ позволил определить группы землетрясений, для которых величины $\Delta\phi$ проявляют тенденцию к определенному интервалу значений (Рис. 8).

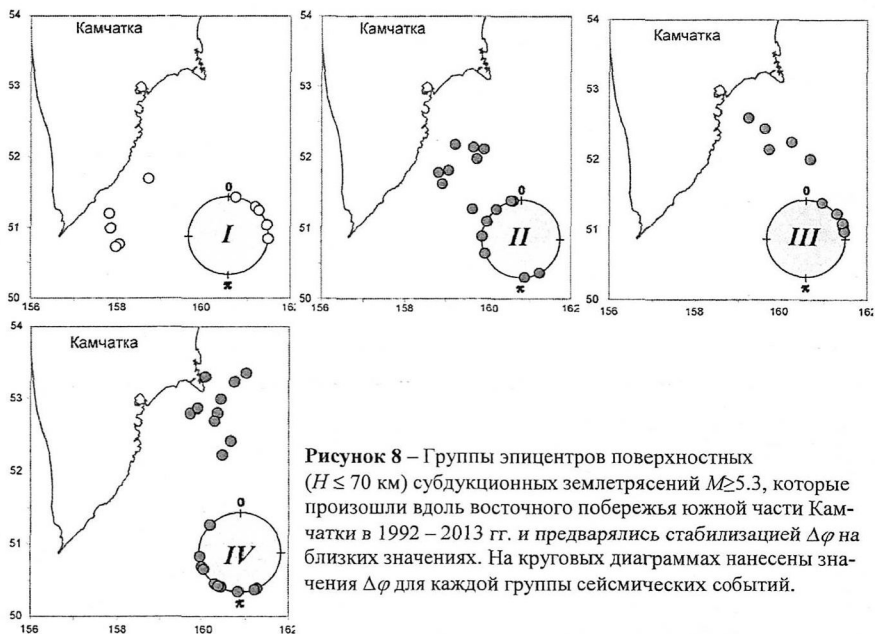


Рисунок 8 – Группы эпицентров поверхностных ($H \leq 70$ км) субдукционных землетрясений $M \geq 5.3$, которые произошли вдоль восточного побережья южной части Камчатки в 1992 – 2013 гг. и предварялись стабилизацией $\Delta\phi$ на близких значениях. На круговых диаграммах нанесены значения $\Delta\phi$ для каждой группы сейсмических событий.

Отмечено, что в соседствующих пространственных группах значения $\Delta\phi$ различаются на π , то есть характерная для группы фаза $\Delta\phi$ меняется на противоположную при переходе от одной группы к другой. Предполагается в качестве одной из возможных причин таких аномалий распределения $\Delta\phi$ принадлежность землетрясений группы к одному блоку среды. Сопоставление с тектоникой района не дает однозначной согласованности выявленной группировки с разломными структурами, хотя сам неслучайный характер эффекта группирования достаточно очевиден. Следовательно, значение прогностического параметра $\Delta\phi$ зависит от состояния и свойств среды в районе очаговой зоны готовящегося землетрясения, то есть от положения будущего очага. Следует отметить, что обнаруженное явление заслуживает внимания не только в связи с прогнозной тематикой, но и как проявление фундаментального эффекта формирования и распространения деформаций и напряжений в сложнопостроенной блоковой среде.

3.3.3 *Воспроизводимость выявленного эффекта стабилизации фазы* рассмотрена на примере землетрясений 16.06.2003 г. $M=6.9$ и 10.06.2004 г. $M=6.8$ (Рис. 9).

Основываясь на пространственной близости гипоцентров, схожести параметров очагов, высокой корреляции волновых форм, эти два землетрясения определены как

Дуплет – пара разнесенных во времени однотипных глубинных подвижек в локальной области, подготовка которых также может иметь сходные черты. Появление двух идентичных землетрясений в одном месте с разрывом во времени, достаточным для формирования предвестника, – явление редкое, даже уникальное. Оно дает возможность проверить и принципиально подтвердить *воспроизводимость* наблюдаемых эффектов в естественных условиях сейсмоактивного региона.

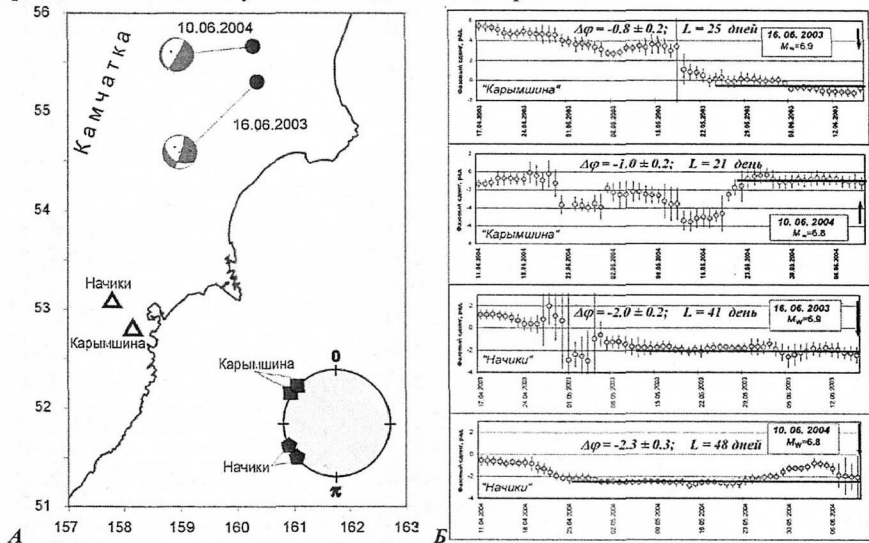


Рисунок 9 – А) Схема Камчатки с отмеченным положением пунктов ВСШ и эпицентрами землетрясений 16.06.2003 г. $M = 6.9$ и 10.06.2004 г. $M = 6.8$. На круговых диаграммах нанесены значения $\Delta\phi$ для обоих землетрясений по данным станций “Начики” и “Карымшина”. **Б)** Временной ход сдвига фаз $\Delta\phi$. Стрелкой отмечен момент землетрясения, горизонтальной линией – участок стабилизации параметра.

Перед этими событиями на обеих камчатских станциях была зафиксирована стабилизация фазового сдвига $\Delta\phi$ по приливной волне O_1 (Рис. 9). Отмечено:

1. Длительность стабилизации $\Delta\phi$ перед землетрясениями дуплета для двух пунктов наблюдений различна, однако в пределах каждого пункта она имеет близкие значения перед обоими землетрясениями: 41 – 48 суток для “Начик” и 21 – 25 суток для “Карымшина”. Причем, хотя эпицентральные расстояния сравнимы между собой, стабилизация $\Delta\phi$ на станции “Начики” в обоих случаях продолжалась примерно в два раза дольше, чем на станции “Карымшина”.
2. Значение параметра $\Delta\phi$ одинаково на каждом из двух пунктов наблюдений в пределах ошибки определения.

Таким образом, показана воспроизводимость изучаемого предвестника: подготовка землетрясений с близкими параметрами отражается в схожести параметров предвестника (значение и продолжительность стабилизации $\Delta\phi$).

3.3.4 Сопоставление приливных параметров ВСШ с сейсмичностью по данным станций на о. Шикотан (Малые Курилы) и м. Эримо (о. Хоккайдо, Япония) подтвердило существование аналогичного предвестникового эффекта в других геологических условиях.

3.4 Концептуальная модель влияния удаленного очага землетрясения на параметры ВСШ. О зоне сбора ВСШ и протяженных приповерхностных зонах дилатансии, формирующихся при подготовке сильных землетрясений. Для решения проблемы изменения тензочувствительности ВСШ в период подготовки сильных землетрясений на большом расстоянии от их очагов была привлечена гипотеза², где рассматриваются процессы формирования протяженных приповерхностных зон дилатансии и согласно которой, концентрация напряжений, предшествующих возникновению сильного землетрясения, вносит свой вклад в изменение свойств среды в объеме очага и прилежащих к нему обширных приповерхностных областях. При этом происходят крупные реологические изменения в среде и формируются аномальные зоны геофизических полей разной природы. Наиболее универсальным механизмом развития изменений в среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии среды, понимаемое как нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. Влияние процессов раскрытия микротрещин могут испытывать такие геофизические параметры как газовая и флюидная проницаемость областей земной коры, уровень подземных вод, электрическое сопротивление, интенсивность газовых потоков и сейсмической эмиссии и др.

Основные отличия предлагаемого подхода от построений приповерхностных зон дилатансии, выполненных ранее другими авторами:

– использование модели протяженного очага землетрясения. Ранее А.С. Алексеевым, С.В. Гольдиным, Л.А. Назаровой, А.С. Пережогиним применялись либо единичная сосредоточенная сила, либо пара сил без момента;

– уход от широко используемой в геомеханике модели плоского деформированного состояния к трехмерной модели;

– учет регионального компонента напряженно-деформированного состояния среды: задание фоновых напряжений на основе модели готовящегося сильнейшего землетрясения с использованием данных по реальным сильнейшим сейсмическим событиям Камчатки за исторический период и предположения о фазе сейсмического цикла в настоящее время;

– использование в расчетах сейсмического КПД.

² Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С.81–97.

Задание параметров среды. Свойства среды приняты одинаковыми во всей расчетной области (упругое полупространство). Задаются: плотность породы ($\rho = 3.0 \text{ г/см}^3$), коэффициент внутреннего трения ($\alpha = 0.5$), сцепление породы ($Y = 5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$), модуль сдвига, параметр Ламэ ($\lambda = \mu = 3.675 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$).

Расчет зон дилатансии (по А.С. Алексееву). К области дилатансии отнесено множество точек упругой среды, для которых при заданном поле напряжений $\{\sigma_{ij}\}$ выполнено условие $D_r \equiv \tau - \alpha \cdot (P + \rho g z) - Y \geq 0$, где ρ – плотность породы; g – ускорение свободного падения, z – глубина; $P = -1/3 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – гидродинамическое давление, α – коэффициент внутреннего трения, Y – сцепление породы; $\tau = \sqrt{[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]/6}$ – интенсивность касательных напряжений.

Это условие совпадает с критерием Шлейхера-Надаи разрушения материала под действием скалывающих нагрузок и удовлетворительно описывает процесс предразрушения горных пород (при нагрузке 60–90% от критической) для качественного описания формы области активизации раскрытия трещин.

Решение относится лишь к определению границы перехода упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием системы трещин.

При расчете зон дилатансии D_r поле напряжений определяется как суперпозиция регионального фона и влияния очага рассматриваемого землетрясения.

Дополнительно вычислялась вариация дилатансии δD как разность между D_r и значением дилатансии D_f . D_f – это дилатансия, определяемая только подготовкой модельного сильнейшего землетрясения, без учета рассматриваемого сейсмического события. Именно вариация дилатансии δD демонстрирует протяженность зон влияния очага формирующегося землетрясения на реологические свойства среды.

Пример расчета приповерхностных зон развития дилатансии приведен на рис. 10. Обращает на себя внимание то, что в данном случае область $\delta D > 0$ образует на поверхности две несвязанные между собой зоны неправильной формы.

Во всех приведенных в диссертации случаях станция регистрации ВСШ попадала не только в зону, где $D_r > 0$, но и в зону положительной вариации $\delta D > 0$, вызванной подготовкой сильного локального землетрясения, что представляется важным с точки зрения инициирования особенностей ВСШ, интерпретируемых как предвестники.

В ходе моделирования удалось выяснить:

- Существуют условия (набор параметров, не противоречащих физическим представлениям о реальных физических процессах, протекающих в регионе), при которых модель допускает развитие приповерхностных зон дилатансии в окрестностях регистрирующей станции.
- Результаты существенно зависят от параметров и способа задания модельного сильнейшего землетрясения, определяющего фоновые значения напряжений в сканируемой области.

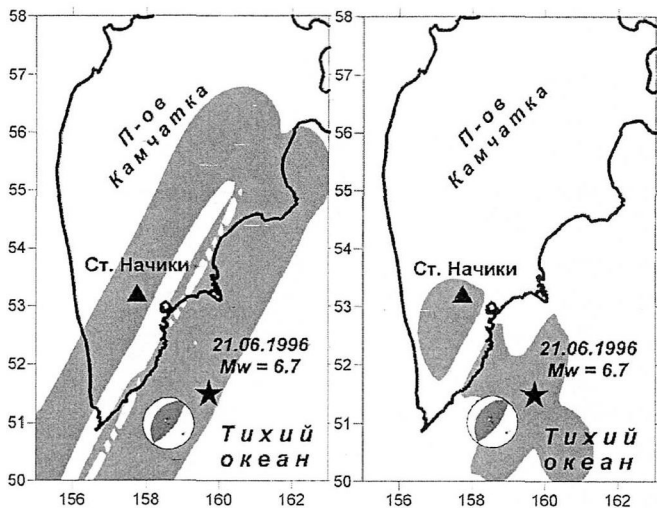


Рисунок 10 – Результаты моделирования приповерхностной зоны дилатансии D_t (слева) и вариации дилатансии ΔD (справа) для землетрясения 21.06.1996, $M_w = 6.8$. Показаны горизонтальные сечения для глубины $z = 0$. Серой заливкой выделены области положительных значений параметров. Звездочкой обозначен эпицентр землетрясения.

3.5 К вопросу о приливной модуляции сейсмических шумов при изменении частотного диапазона регистрации. Недостатком описанных выше исследований ВСШ является ограниченность частотного диапазона регистрируемого сигнала. При этом неизбежно возникает вопрос: “Будут ли приливные эффекты, выявленные в ВСШ на частоте $f = 30$ Гц, проявляться и в других частотных диапазонах?”.

Для ответа на этот вопрос был использован широкополосный сейсмометр ASA-3 конструкции А.С. Черепанцева, обладающий чувствительностью $50 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ в диапазоне частот 5–400 Гц. Регистрация была организована на сеймостанции “Начики”, на том же постаменте, где установлена узкополосная аппаратура ВСШ. Это обеспечило возможность для сравнения результатов, полученных различными типами приборов, с акцентом на сопоставление различных частотных диапазонов.

Отмечены следующие особенности регистрируемого сигнала:

1. Спектр сигнала представляет собой набор компонент со стабильным соотношением их спектральных плотностей.
2. Частоты, соответствующие максимумам спектра, устойчивы во времени.
3. Существуют частоты, для которых спектральная плотность всегда превышает уровень собственных шумов аппаратуры.

Для дальнейшего анализа были сформированы временные ряды значений спектральных плотностей сейсмического шума на 12 частотах, соответствующих максимумам спектра в диапазоне 68–319 Гц. По аналогии с разделом 3.3 рассматриваются фазовые соотношения между ВСШ и приливами. Обнаружено, что:

- 1) Временной ход $\Delta \varphi$ для различных частотных компонент ВСШ соответствует среднему временному ходу. В этом случае осреднение позволяет получить оценки временного хода $\Delta \varphi$ с большей точностью и допускает использование отклика не толь-

ко на мощные приливные волны типа O_1 , но и на существенно более слабые – Q_1 .

2) Временной ход среднего $\Delta\varphi$ для двух приливных волн O_1 и Q_1 также имеет совпадающие тенденции.

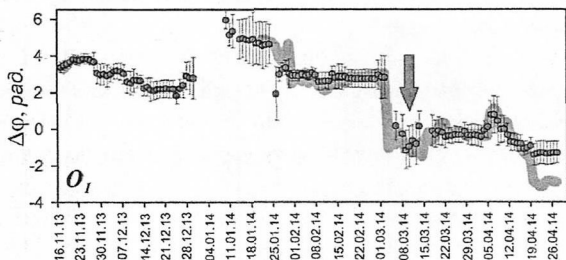


Рисунок 11 – Сопоставление временного хода фазового сдвига $\Delta\varphi$ приливной компоненты ВСШ при узкополосной ($f = 30$ Гц) (точки) и широкополосной (сплошная линия) регистрации относительно приливной волны O_1 . Стрелка указывает на время землетрясения 10.03.2014 г. $M_L = 5.0$.

Проведение по единой методике обработки данных регистрации ВСШ различными типами аппаратуры – узкополосной и широкополосной, позволило провести сравнение полученных результатов. На рис. 11 приведен временной ход среднего $\Delta\varphi$ для приливной волны O_1 по данным широкополосной регистрации и аналогичные данные узкополосной регистрации. Отмечено их соответствие. Обращено внимание на стабилизацию фазы в течение 5 недель в феврале – марте 2014 г. и последовавшее затем резкое изменение фазы на ≈ 4 . Как показано выше, такое поведение фазы наблюдается при подготовке и реализации сильного землетрясения. В данном случае речь идет о землетрясении 10.03.2014 г. $M_L = 5.0$, произошедшем на эпицентральной расстоянии 117 км от станции “Начики”.

На основании проведенного сравнения делается важный методологический вывод: частота $f = 30$ Гц, на которую настроена узкополосная аппаратура ВСШ, не является уникальной с точки зрения обнаружения приливной модуляции и мониторинга ВСШ по предлагаемой методике. Аналогичные результаты могут быть получены для ВСШ и на других частотах при использовании аппаратуры, позволяющей обеспечить необходимую чувствительность.

Заключение к Главе 3. Экспериментально обнаружен эффект стабилизации фазы приливной компоненты ВСШ при подготовке сильного землетрясения, на основе которого была предложена методика прогноза сильных землетрясений. В результате анализа этого эффекта (а) показана его *воспроизводимость*, под которой понимается идентичное поведение параметров ВСШ при подготовке идентичных сильных землетрясений; (б) получена эмпирическая зависимость порога “чувствительности” эффекта стабилизации фазы к эпицентральному расстоянию и магнитуде готовящегося землетрясения; (в) выявлены пространственные зоны, согласующиеся с тектоникой региона, землетрясения в которых предварялись стабилизацией фазы на близких значениях; (г) обнаружены сходные тенденции синхронизации приливной компоненты ВСШ и приливного потенциала в процессе подготовки землетрясений для Камчатки, Хоккайдо и Шикотана; (д) показано, что приливные эффекты, обнаруженные на $f = 30$ Гц, проявляются и в более широком диапазоне частот ВСШ.

Основные результаты Главы 3 опубликованы в статьях [4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 27].

Глава 4. Механизм приливной модуляции высокочастотных сейсмических шумов на основе амплитудно-зависимой диссипации

В главе представлено объяснение возникновения приливной модуляции ВСШ и ее особенностей, связанных с подготовкой сильных землетрясений, за счет модуляции размера области их сбора, обусловленной негистерезисным амплитудно-зависимым поглощением в земных породах. Реологическая модель определяет механизм таких потерь за счет наличия “мягких” дефектов в структуре материала. Возможный физический механизм обсуждается для двух важнейших случаев – сухие и флюидонасыщенные породы.

Для объяснения приливной модуляции ВСШ привлечена известная в акустике модель амплитудно-зависимой диссипации³, обусловленной наличием мягких дефектов в среде-матрице, в нашем случае – микроструктурных особенностей горных пород.

Для выявления структурно-обусловленной амплитудно-зависимой диссипации достаточно учесть нелинейный характер деформирования и наличие потерь только на мягких дефектах, пренебрегая нелинейностью и потерями в среде-матрице, причем величина локальной деформации ε_1 значительно больше, чем средняя деформация ε материала в силу высокой мягкости дефекта, характеризуемой малым параметром $\zeta \ll 1$. При этом модуль упругости E характеризует однородную среду-матрицу. Для обсуждения эффектов, наблюдающихся при очень малых деформациях, достаточно учесть квадратичный порядок упругой нелинейности дефектов.

Если в среде созданы квазистатическая приливная деформация ε_0 и осциллирующая сейсмическая деформация $\varepsilon_\omega = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ на частоте ω , то согласно модели дефекты дают одинаковые по порядку величины нелинейные вклады в *относительное* изменение упругого модуля E_{eff}/E и в *абсолютное* (а не относительное!) изменение декремента θ . Поэтому, в связи с тем, что в горных породах декремент $\theta \ll 1$, амплитудно-зависимые (в нашем случае от ε_0) относительные вариации декремента $\frac{\Delta\theta}{\theta} \sim 2|\gamma|\varepsilon_0/\zeta$ оказываются многократно выше, чем сопутствующие им вариации упругого модуля $\frac{\Delta E}{E} \gg \Delta\theta \sim \frac{\Delta E}{E}$ и определяются фактически только собственной нелинейностью дефектов γ и их эффективной мягкостью ζ и не зависят от концентрации ν дефектов.

Оценка ожидаемой глубины приливной модуляции эндогенных шумов сделана исходя из заданного уровня источников в среде, в которой внешнее воздействие модулирует ее упруго-диссипативные свойства:

³ Zaitsev V., Sas P. Dissipation in microinhomogeneous solids: inherent amplitude-dependent attenuation of a non-hysteretical and non-frictional type // Acta Acust. Acustica. 2000. Vol.86. P.429–45.

$$I(\omega) \propto \sum_i A_i^2 \propto \int_0^{\infty} \left(\frac{\exp[-\theta(\omega) \frac{r}{\lambda}]}{r} \right)^2 r^2 dr \propto \frac{\lambda}{\theta(\omega)}.$$

Отсюда следует, что относительные вариации интенсивности принимаемого шума определяются, прежде всего, изменением диссипации:

$$\frac{\Delta I(\omega)}{I(\omega)} \approx \Delta \left(\frac{\lambda}{\theta(\omega)} \right) \left(\frac{\lambda}{\theta(\omega)} \right) = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} - \frac{\Delta \theta}{\theta} \approx - \frac{\Delta \theta}{\theta},$$

учитывая, что для микронеоднородных сред $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta E}{2E} \ll \frac{\Delta \theta}{\theta}$,

Приняв умеренное значение параметра собственной нелинейности дефекта $|\gamma| = 5$ и значение параметра мягкости ζ в диапазоне $10^5 - 10^6$, для амплитуды приливных деформаций $\varepsilon_0 \sim 10^{-8}$ ожидаемая величина индуцированных вариаций эндогенного шума составляет $\frac{\Delta I(\omega)}{I(\omega)} \sim 0.01 - 0.1$. Эта оценка прекрасно согласуется с характерной глубиной наблюдаемых вариаций сейсмического шума.

Обращено внимание на то, что вариации упруго-диссипативных свойств трещины, сопоставимые по величине со случаем ее полного закрытия, могут иметь место и за счет деформирования именуемых в реальных трещинах *внутренних контактов*, состояние которых может существенно изменяться, даже если раскрытие трещины в целом изменилось еще незначительно. При этом с точки зрения изменения упруго-диссипативных свойств эффективные значения показателя мягкости ζ порядка $10^6 - 10^7$ могут быть достигнуты и для трещин с вполне реалистичными значениями аспекта отношения $\alpha \sim 10^5 - 10^3$. Такие средние значения α позволяют им еще не закрываться при средних деформациях среды, гораздо больших, чем $\varepsilon \sim \zeta \sim 10^6 - 10^7$.

Дальнейший анализ проведен, используя уже не реологический подход, а *физические механизмы диссипации*, которая должна иметь место в реальных неровных трещинах с внутренними контактами.

Рассмотрены два важнейших для горных пород случая: сухие трещины с внутренними контактами, на которых эффективно происходит диссипация упругой энергии за счет термоупругого механизма, и трещины аналогичной геометрии, но насыщенные жидкостью.

Ключевую роль при этом играет тот факт, что поверхности трещин обычно имеют волнистую форму. Изначально совпадавшие волнистые поверхности при возникновении трещины обычно не просто параллельно раздвигаются по нормали, но и смещаются тангенциально, способствуя образованию внутренних контактов (или перетяжек), которые преимущественно имеют удлиненную, "полосковую" форму, как схематически изображено на рис. 12.

Для обсуждаемых малых (типичных для ВСШ) деформаций хорошо известен механизм достаточно эффективной диссипации благодаря локально повышенным на су-

хой трещине термоупругим потерям. Рассматривается модификация этого механизма с учетом полосковых контактов.

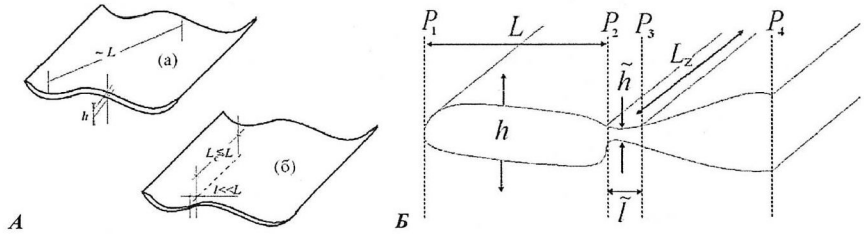


Рисунок 12 – Два типа рассматриваемых трещин

А) Трещина с волнистыми поверхностями без внутреннего контакта (а) и при наличии полоскового контакта (б) размером $L_c \times l$. При $L_c \approx l$ полосковый контакт переходит в точечный. Б) Трещина с локальным сужением, в области которого концентрируются градиенты скорости и давления заполняющей жидкости. Сужение имеет раскрыв \tilde{h} , много меньший среднего раскрыва h трещины и длину $\tilde{l} \ll L$.

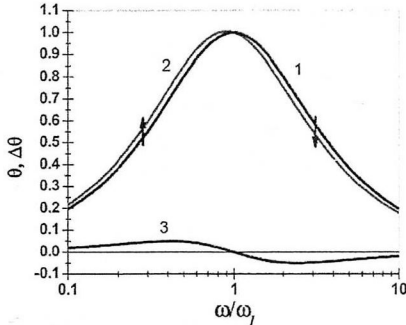


Рисунок 13 – Кривые релаксационного поглощения в случае одинаковых контактов: 1 – невозмущенная кривая при фоновой средней деформации ε_0 ; 2 – возмущенная кривая, максимум которой сдвинут на 10% по оси частот; 3 – отдельно показанная частотная зависимость поправки к исходной кривой.

Подчеркнем следующие важные особенности релаксационной кривой в случае термоупругого поглощения на внутреннем контакте в трещине. При относительно небольшом изменении среднего раскрыва трещины происходит, прежде всего, изменение ширины полоскового контакта без существенного изменения его длины. Изменение релаксационной частоты ω_1 (за счет изменения ширины контакта) приводит к тому, что пик поглощения смещается, как схематически показано на рис. 13. При таком смещении пика для волн с частотами $\omega > \omega_1$ и $\omega < \omega_1$ изменения поглощения имеют противоположные знаки. Иными словами, небольшое по величине почти синусоидальное изменение положения максимума (например, под влиянием приливных деформаций) для волн с частотами $\omega > \omega_1$ и $\omega < \omega_1$ должно вызывать модуляцию величины поглощения с противоположными фазами (сдвинутыми на π радиан). Если же выбранная частота наблюдения ω первоначально находится с одной стороны от максимума, то при достаточно сильном смещении его среднего положения (например, под действием более сильных тектонических напряжений) она может оказаться по другую сторону от максимума. В результате первоначальная фаза приливной модуляции такой волны должна

сменится на противоположную.

Проведена оценка степени влияния приливных и фоновых тектонических деформаций на положение релаксационного максимума термоупругого поглощения: изменение положения релаксационного максимума для приливного воздействия на единицы и даже десятки процентов, а для тектонических деформаций $10^{-6} - 10^{-5}$ – в несколько раз. В результате наблюдаемая частотная компонента ВСШ, находившаяся по одну сторону от максимума, после столь значительного изменения его положения может оказаться лежащей на другом склоне кривой поглощения после землетрясения, что приведет к смене фазы приливной модуляции на противоположную. Подобный эффект может наблюдаться также в процессе подготовки землетрясения при росте тектонических деформаций, тогда смена фазы приливной модуляции произойдет до землетрясения.

Показано, что внутренние контакты с шириной $l \sim 100$ мкм могут обеспечивать вклад в амплитудно-зависимое поглощение, достаточный для получения относительных изменений декремента на уровне нескольких процентов под влиянием приливных деформаций. При этом под действием тектонических напряжений положение релаксационного максимума может попадать в диапазон порядка десятков герц и сдвигаться в широких пределах относительно частоты $f = 30$ Гц, использовавшейся в обсуждаемых наблюдениях ВСШ, описанных в Главе 3.

Показано, что полученные для одиночного контакта выводы о противоположных знаках изменения поглощения по разные стороны от релаксационного максимума при его сдвиге остаются в силе для ансамбля контактов, распределенных по параметрам, что должно иметь место в реальных горных породах.

При рассмотрении *трещин, содержащих вязкую жидкость*, ключевую роль также играют уже обсуждавшиеся волнообразные неровности поверхностей реальных трещин, которые могут создавать в трещине *перетяжки*, почти перекрывающие сечение трещины. При наличии такой тонкой перетяжки именно в ее окрестности локализуются вязкие потери за счет локально повышенных градиентов скорости и давления в потоке и, соответственно, сильно меняется величина характерной релаксационной частоты вязкостного происхождения. Так же как и величина поджатия контактов в случае термоупругих потерь, раскрытие трещины в области тонкой перетяжки может быть многократно (на 2 – 3 порядка) более чувствительно к средней деформации окружающего материала. Поэтому приливные деформации с $\varepsilon \sim 10^{-8}$ становятся способными существенно менять параметры потока вблизи перетяжки, хотя изменения среднего раскрытия трещины остаются еще пренебрежимо малыми. Показано, что для флюидонасыщенных трещин тоже имеет место знакопеременное изменение величины декремента в зависимости от взаимного положения частоты релаксационного максимума и наблюдаемой частотной компоненты сигнала. Следовательно, при сильном изменении фонового тектонического напряжения также может происходить изменение их относительного положения и смена фазы приливной модуляции на противоположную.

Проведенное рассмотрение двух важнейших для трещин механизмов диссипации, не имеющих порогового по амплитуде характера и потому полностью применимых к ВСШ с деформациями $10^{-13} - 10^{-11}$, показывает, что учет полосковых неровностей (контактов и перетяжек), имеющихся в реальных трещинах, приводит к выводу, что приливные деформации могут обеспечить вариации декремента на уровне от единиц до десятка процентов. Это может соответствовать аналогичной по уровню модуляции интенсивности принимаемых ВСШ за счет вариации размера эффективной области сбора шумов. При этом для согласования с уровнем эффекта, традиционно наблюдающегося в диапазоне десятков герц, должно быть достаточно очень небольшой доли трещин с “нужными” характеристиками от их общего числа: порядка единиц процентов в случае термоупругого механизма, и еще значительно меньшая доля может быть достаточна в случае флюидонасыщенных трещин.

Показано, что одинаковые качественные (функциональные) особенности термоупругой и вязкой релаксации, указывающие на возможность изменения фазы модуляции на π радиан в зависимости от относительного положения релаксационного максимума и выбранной частоты наблюдения, достаточно грубы по отношению к форме распределения трещин по параметрам. Наблюдавшееся в окрестности многих землетрясений изменение фазы модуляции на π радиан, таким образом, можно объяснить сильным сдвигом положения релаксационного максимума (относительно фиксированной частоты наблюдения) в результате достаточно быстрого изменения напряженно-деформированного состояния среды.

Что касается наиболее устойчиво отмечавшегося практически перед всеми сильными землетрясениями эффекта стабилизации фазы модуляции ВСШ, он также может быть объяснен тем, что в результате накопления перед землетрясением сильных и не меняющих знак напряжений обеспечивается стабилизация положения релаксационного максимума на оси частот относительно наблюдаемой компоненты сигнала. Напротив, после снятия этого напряжения в результате землетрясения остающиеся фоновые напряжения и деформации, хотя и заметно превышающие приливные, некоторое время не являются стабильными и могут существенно менять не только величину, но и знак. Следствием этого должна быть нестабильность положения релаксационного максимума и, соответственно, нестабильность фазы модуляции.

Несмотря на остающуюся гипотетическую возможность прямого влияния приливных деформаций на саму эмиссию ВСШ, имеющиеся данные по особенностям приливной модуляции ВСШ хорошо согласуются с предсказаниями модели. Кроме того, предложенная диссипативная модель независимо подкрепляется наблюдениями амплитудно-фазовой приливной модуляции излучения искусственных сейсмоакустических источников⁴, к которым гипотетическое влияние приливов на источники эмис-

⁴ Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 60–64.

сии заведомо не имеет отношения.

Заключение к Главе 4. Предложено объяснение известному уже более 30 лет, но не имевшему удовлетворительной интерпретации эффекту корреляции между приливными деформациями земной коры и наблюдающимися вариациями интенсивности сейсмических шумов. Модель приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов, обусловленной негистерезисным амплитудно-зависимым поглощением в земных породах, рассмотрена на реологическом и физическом уровнях. Для двух важнейших случаев (сухие и флюидонасыщенные породы) показана принципиальная важность наличия в содержащихся в породе трещинах внутренних контактов. Предложенный механизм объяснил ряд экспериментально обнаруженных особенностей приливной модуляции ВСШ: (а) глубина модуляции порядка первых процентов, (б) стабилизация фазы модуляции в период, предшествующий сильному землетрясению, (в) часто отмечаемое изменение фазы на противоположную после возникновения землетрясения.

Основные результаты Главы 4 опубликованы в статьях [21, 26].

Глава 5. Лабораторное моделирование приливной модуляции высокочастотных сейсмических шумов

Лабораторные эксперименты направлены на воспроизведение влияния земных приливов на сейсмичность в контролируемых условиях. Аналогом сейсмических событий здесь выступают импульсы акустической эмиссии (АЭ). Тектонические деформации имитируются одноосным сжатием с постоянной скоростью, приливы – наложением на него слабых периодических вариаций. Для соблюдения подобия между натурными наблюдениями и лабораторным экспериментом амплитуда слабых вибраций должна быть на несколько порядков меньше среднего уровня фоновой деформации. В природе это соотношение составляет 10^{-3} – 10^{-4} .

Задачами экспериментов были обнаружение эффекта синхронизации АЭ с периодическим воздействием, определение связи особенностей излучения АЭ с напряженно-деформированным состоянием образца, подтверждение эффекта модуляции.

Лабораторное моделирование проведено в Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН с использованием электрогидравлической системы INOVA, позволяющей проводить полномасштабные эксперименты по изучению процессов разрушения горных пород. Программа управления позволяет контролировать ход эксперимента в автоматическом режиме. Имеется возможность задавать практически любой режим испытаний, включая программируемое модулирующее воздействие.

Использованные материалы. Для проведения испытаний на системе INOVA изготавливаются цилиндрические образцы горных пород высотой 60 мм и диаметром 30 мм. В качестве основного исходного материала был использован кварцевый песчаник Bentheimer.

Боголюбов Б.Н., Лобанов В.Н., Назаров В.Е., Рылов В.И., Стромков А.А., Галанов В.И. Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунно-солнечного прилива // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 8. С. 1045–1049

Режим испытаний. В качестве основного был выбран режим осевой деформации со средней скоростью, равной $4 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (ступенчатое деформирование на $4 \cdot 10^{-6}$ каждые 10 с), на которую накладывалось модулирующее воздействие в виде меандра с периодом $T = 60$ с. Проведено четыре эксперимента с различной амплитудой меандра по деформации $A_\varepsilon = (16, 8, 4, 2) \cdot 10^{-6}$. Эксперименты велись до полного разрушения исследуемого образца.

Отличие представленных экспериментов от испытаний, проведенных ранее другими исследователями:

(1) – Точность удержания системой INOVA заданных физических параметров превосходит имеющиеся аналоги и позволяет контролировать модулирующее воздействие с высокой точностью, необходимой для целей исследования фазовых соотношений “внешнее воздействие – эмиссионный отклик”.

(2) – В рассматриваемых в разделе экспериментах удалось достичь соотношения “периодическая деформация – фоновая деформация” порядка 10^{-3} , что близко к природным условиям.

Для решения поставленных задач использовались следующие подходы:

1) Возможный эффект синхронизации неизбежно приведет к неравномерности распределения числа акустических импульсов по фазе периодической подгрузки. Поэтому должна быть проверена гипотеза о равномерности распределения.

2) Стабильность отклика АЭ может быть оценена через функцию автокорреляции с временным сдвигом на 1 период меандра подгрузки ($T = 60$ с). Низкие значения корреляции на выявленных участках синхронизации будут соответствовать нестабильности отклика АЭ на периодическую подгрузку.

3) Характер отклика АЭ и его изменение в ходе эксперимента могут быть оценены при использовании схемы Бюй-Балло, уже применявшейся выше (Глава 3).

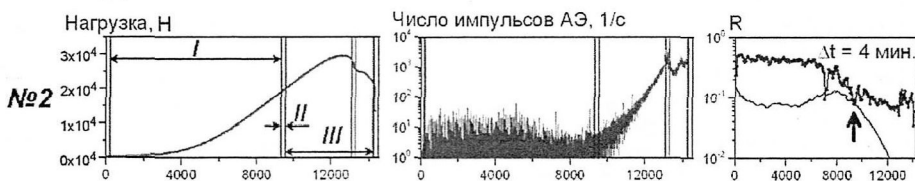


Рисунок 14 – Эксперимент № 2 (амплитуда периодической деформации $A_\varepsilon = 8 \cdot 10^{-6}$). *Слева:* временной ход нагрузки пресса. *Центр:* временная плотность числа импульсов АЭ. *Справа:* временной ход параметра R в скользящем окне 4 мин. (сплошная линия – R_{cr}). Вертикальными линиями и стрелками обозначены три стадии отклика АЭ на периодическое воздействие – I, II, III. Серый сегмент отмечает интервал, исключенный из обработки из-за перегрузки канала регистрации потока АЭ.

Форма нагрузочной кривой приведена для эксперимента № 2 (Рис. 14), как пример, с целью демонстрации положения характерных участков напряженно-деформированного состояния образца и связанной с ним АЭ.

Для выявления эффекта синхронизации АЭ периодическим воздействием приме-

нялась процедура, основанная на критерии равномерности Рэлея $R < R_{cr}$, где R_{cr} – критическое значение R с уровнем значимости 0.01. В случае отклонения гипотезы о равномерности этого распределения АЭ по фазе периодической подгрузки можно говорить о синхронизации потока АЭ с подгрузкой. Расчеты R показали, что в каждом эксперименте существуют временные интервалы, когда наблюдается синхронизация АЭ с меандром деформации, т.е. $R > R_{cr}$, – это интервалы *I* и *III* (Рис. 14), а между ними выявлен участок *II* отсутствия синхронизации, т.е. $R < R_{cr}$. Этот интервал во всех четырех случаях попадает на линейный участок нагрузочной кривой, и именно после него начинается экспоненциальное увеличение потока АЭ. Отмечена различная длительность интервала *II* в экспериментах: она увеличивается с уменьшением амплитуды меандра от 2 мин. до 13 мин.

Несмотря на то, что коэффициент автокорреляции АЭ при сдвиге $\Delta t = 60$ с в различных экспериментах неодинаков (с уменьшением амплитуды периодической подгрузки он также уменьшается), отмечено, что в целом картина очень схожа:

- 1) На начальном участке (участок увеличенных значений потока АЭ, далее *I-A*) коэффициент корреляции имеет большое значение и наблюдается тенденция к постоянной величине корреляции, то есть можно говорить о стабильности синхронизации АЭ с меандром подгрузки;
- 2) На участке постоянного потока АЭ (*I-B*) коэффициент корреляции медленно уменьшается до незначимых величин. Одновременно до статистической незначимости снижается и R ;
- 3) Отсутствие корреляции наблюдаются на большей части экспоненциального роста потока АЭ, но нагрузочная кривая все еще линейна. И только на начало этого участка приходится относительно короткий участок *II* с незначимым R , то есть в остальное время (*III-A*) можно говорить об опять возникшей синхронизации, при этом отмечая ее нестабильный характер;
- 4) Затем происходит рост корреляции до высоких значений, наблюдающихся на участке *I-A*. Сопоставив временные интервалы выявленной коррелированности с нагрузочной кривой, можно заключить, что с переходом образца в состояние дилатансии отклик АЭ на модулирующее воздействие становится стабильным (участок *III-B*).

На основании этих наблюдений сделан вывод, что характеристикой отклика АЭ на дополнительное периодическое воздействие является в целом *нестабильность*, но существуют участки, когда он достаточно стабилен.

На рис. 15 представлена типичная форма отклика АЭ на периодическую деформационную подгрузку для набора выделенных участков. На стадиях *I-A* и *I-B* выделенные максимумы АЭ соответствуют по времени приращению деформации. Наибольший всплеск АЭ совпадает с положительным фронтом меандра подгрузки. После каждого всплеска наблюдается релаксирующий спад, подобный афтершоковому режиму в сейсмичности. Очевиден пониженный уровень АЭ при отрицательном значении меандра подгрузки.

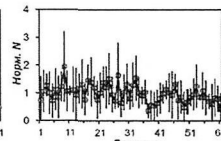
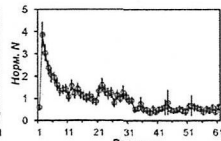
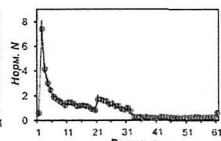
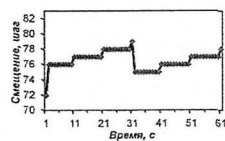
Совершенно другая форма отклика АЭ наблюдается на стадиях *III-A* и *III-B*: она близка к прямоугольной форме меандра подгрузки, особенно на стадии *III-B*. Отсутствие релаксации после прохождения положительного фронта меандра подгрузки указывает на принципиальное различие в механизмах формирования периодического отклика АЭ на стадиях *I* и *III*.

X, шаг генератора

АЭ, стадия *I-A*

АЭ, стадия *I-B*

АЭ, стадия *II*



АЭ, стадия *III-A*

АЭ, стадия *III-B*

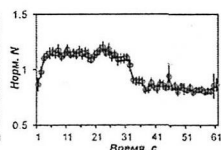
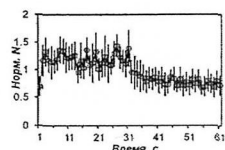


Рисунок 15 – Форма отклика АЭ на периодическое ($T=60$ с) модулирующее воздействие X : нормированное число импульсов АЭ (среднее значение, 2σ доверительный интервал) на различных стадиях напряженно-деформированного состояния образца №2.

При сравнении формы отклика на стадиях *III-A* и *III-B* показано, что при ее совпадении в общих чертах, (1) амплитуда отклика на стадии *III-B* существенно ниже, чем на стадии *III-A*, то есть глубина модуляции уменьшается в процессе нагружения образца, (2) дисперсии получаемых оценок для стадии *III-B* уменьшились на порядок по сравнению со стадией *III-A*. Здесь уместно напомнить, что стадия *III-B* определялась по дилатантному состоянию образца, а *III-A* частично находится на линейном (упругом), частично – на нелинейном (пластическом) участках нагрузочной кривой, но в целом – до начала разуплотнения образца, и для этого интервала характерна нестабильность формы отклика АЭ. Именно эта последняя особенность и могла привести к большой дисперсии оценок.

Для полученных в ходе экспериментов результатов проведены аналогии с эффектами модуляции сейсмических шумов, выделяемыми по натурным данным:

- 1. Нестабильность модуляции.** Как в природе, где приливное воздействие существует всегда, так и в эксперименте модулирующее деформационное воздействие было активно в течение всего времени. Однако, показано, что существуют интервалы времени, на которых эффект модуляции АЭ не наблюдается. Аналогичные интервалы отсутствия синхронизации сейсмических шумов с приливами отмечены выше (Глава 3).
- 2. Связь модуляции АЭ с напряженно-деформированным состоянием** образца горных пород обнаружена при разбиении всего времени эксперимента в соответствии с фазами нагружения образца. Наиболее ярко эффект модуляции прослеживается при дилатантном разуплотнении. Однако модуляция была определена и на завершающей части упругих деформаций. Это согласуется с описанным выше (Глава 3) предвестниковым поведением ВСШ перед сильными землетрясениями. И если аналогом подготовки зем-

летрясения можно рассматривать стадию, предваряющую разрушение образца, то появление модуляции ВСШ перед землетрясением соответствует модуляции АЭ на стадии пластических деформаций.

Как главный результат проведенных экспериментов в контексте работы рассматривается обнаружение стадийности в акустическом отклике разрушаемого образца на слабое периодическое внешнее воздействие. Причем различные стадии связываются с различными этапами напряженно-деформированного состояния образца в процессе разрушения.

Именно на участке *III* можно говорить о модуляции, когда временной ход интенсивности потока АЭ соответствует по форме периодическому воздействию. Примечательно, что глубина модуляции на участке *III* в экспериментах №№ 4 – 5, то есть при различии “фоновой” и “периодической” деформации на три порядка (как для соотношения тектонической и приливной деформации в природе) находится в пределах 10% и соответствует представленным выше данным о глубине приливной модуляции ВСШ.

Выявленная стадийность, рассмотренная как аналог нестабильности приливной модуляции сейсмических шумов в сейсмоактивном регионе, косвенно обосновывает использование приливного отклика для мониторинга напряженного состояния среды.

Заключение к Главе 5. Проведенные лабораторные эксперименты по моделированию приливных эффектов в сейсмичности (одноосное сжатие образцов) показали существование амплитудной модуляции акустической эмиссии на стадии предразрушения образца в условиях малых периодических осциллирующих деформации (превышение на три порядка медленно меняющейся фоновой деформации над модулирующей соответствует соотношению между тектонической и приливной деформациями). Как в природе, где приливное воздействие существует всегда, так и в эксперименте модулирующее деформационное воздействие было активно в течение всего времени. Показано, что существуют интервалы времени, на которых эффект модуляции акустической эмиссии не наблюдается, что аналогично интервалам отсутствия синхронизации ВСШ с приливами. Наиболее ярко эффект модуляции прослеживается на завершающей стадии предразрушения – дилатантном разуплотнении. Однако модуляция была определена и на завершающей части упругих деформаций. Это согласуется с предвестниковым поведением ВСШ перед сильными локальными землетрясениями.

Основные результаты Главы 5 опубликованы в статье [25].

Глава 6. Приливные эффекты в сейсмичности: аналогии с модуляцией ВСШ

Целью Главы является проведение аналогии между приливной модуляцией сейсмического шума и корреляцией слабых землетрясений с приливами. На основе гипотезы о коррелируемости слабых землетрясений в период подготовки сильного землетрясения обосновывается задача обнаружения таких аномалий. Представлены разработанная методика, реализующая такой поиск, и пример ее реализации. Предложен возможный механизм явления, аналогичный механизму воздействия приливов на ВСШ.

ВСШ рассматривается как часть единого сейсмического процесса, но на более

низком энергетическом уровне. Самоподобие сейсмического процесса предполагает идентичные тенденции процессов на различных пространственно-временных и энергетических масштабах. Можно предположить, что приливные эффекты в характеристиках сейсмичности имеют нестабильный характер и зависят от ряда факторов, одним из которых может быть изменение напряженного состояния среды в период подготовки сильного землетрясения.

Рассмотрена фоновая сейсмичность, предшествующая сильному землетрясению, в пространственной области, соответствующей зоне подготовки этого сильного землетрясения, где напряженное состояние среды меняется в наибольшей степени и ожидаемые приливные эффекты могут проявиться наиболее ярко.

Распределение слабых землетрясений по значению фазы отдельных приливных волн, соответствующей времени возникновения этих землетрясений, демонстрирует наличие или отсутствие приливного эффекта. Как пример, на рис. 16 показано распределение фоновой сейсмичности по фазе волны K_1 ($T = 23.93$ час.) для двух временных интервалов 35 и 10 лет, предшествующих землетрясению 21.06.1996 г. $M = 6.8$. И если для длинного ряда наблюдений распределение является равномерным, то для более короткого ряда оно имеет ярко выраженные максимум и минимум.

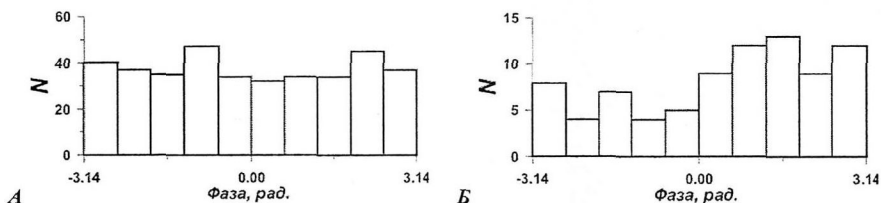


Рисунок 16 – Распределение землетрясений с $M_L \geq 3.5$, произошедших в 1962 – 1996 гг. (А) и в 1986 – 1996 гг. (Б) в очаговой зоне землетрясения 21 июня 1996 г. $M_W = 6.8$, по величине фазы приливной волны K_1 .

Однако ограничение рассматриваемой пространственной области лишь очагом будущего землетрясения представляется недостаточно обоснованным, принимая во внимание работы по предвестникам сильных землетрясений, где отмечаемые аномальные проявления прогностических параметров, основанных на слабой (фоновой) сейсмичности, наиболее ярки в окрестности очага, а не в самом очаге. Поэтому в качестве задачи ставится обнаружение в пространственно-временной области таких зон, где наблюдается приливное воздействие на слабую сейсмичность.

Предложена методика выделения пространственных зон, в которых в течение заданного интервала времени слабая сейсмичность коррелирует с земными приливами. Основными этапами этого алгоритма являются 1) расчет фаз приливных волн на время каждого землетрясения, 2) в заданном временном окне сканирование пространства эллипсами переменного размера и селекция эллипсов с выраженным отклонением распределения фаз от равномерного.

На примере землетрясения 13.11.1993 г. $M = 7.0$ показано, что в области готовяще-

гося очага существуют зоны, в пределах которых время возникновения слабых землетрясений соответствует определенным фазам земных приливов на протяжении нескольких лет перед основным событием. Размер зон сравним с размерами очага. На коротких интервалах (единицы лет) аномалии располагаются в пространстве более компактно, чем на длинных интервалах (16–32 года).

Статистическая значимость ($\alpha = 10^{-9}$) существования приливных аномалий определена проведенным статистическим моделированием методом Монте-Карло.

Полученные результаты подтверждают предположение о нестабильности отклика слабой сейсмичности на приливное воздействие, что представляется аналогом свойства приливных эффектов в сейсмических шумах.

Основываясь на самоподобии сейсмического процесса, применена модель амплитудно-зависимой диссипации (Глава 4) и к землетрясениям. Тогда приливные вариации декремента поглощения θ отразятся в вариациях энергетических параметров землетрясения, и задачей становится обнаружение “приливногo” изменения измеряемого энергетического класса K землетрясения. Такие изменения выявлены при анализе различий в определении K по данным двух станций.

Для K можно записать

$$K = \lg(A/T)_{\max}^2 + \delta(\Delta, h) = \frac{2}{\ln 10} \ln(A/T)_{\max} + \delta(\Delta, h),$$

где A и T – амплитуда и период смещения почвы, $\delta(\Delta, h)$ – калибровочная функция, учитывающая эпицентральное расстояние Δ и глубину очага h .

Учитывая, что A – это амплитуда затухающей с расстоянием r сферической волны ($A = \frac{A_0}{r} \exp(-\theta \frac{r}{\lambda})$), где λ – длина волны: $K = -\frac{2}{\ln 10} \theta \frac{r}{\lambda} + \delta_1(\Delta, h, A_0, f, r)$, где $\delta_1(\dots)$ – функция всех перечисленных аргументов. Считая эти аргументы фиксированными,

$$dK = \frac{2}{\ln 10} \frac{r}{\lambda} \left[d\theta - \theta \frac{d\lambda}{\lambda} \right].$$

В соответствии с моделью амплитудно-зависимой диссипации $d\theta \approx d\lambda/\lambda$, а с учетом типичного значения декремента для горных пород ($\theta \ll 1$): $dK \approx \frac{2}{\ln 10} \frac{r}{\lambda} d\theta$.

Для обнаружения приливных вариаций в значениях K , связываемых с приливными вариациями θ , проведен вычислительный эксперимент. Рассмотрен вариант расположения двух станций и очага землетрясения на одной прямой (Рис. 17). При такой диспозиции предполагается, что 1) влияние ориентации очага землетрясения сведено к минимуму, 2) трассы прямых S -волн, приходящих на станции 1 и 2, будут достаточно близки на начальном участке, соответствующем отрезку “типоцентр – станция 1”.

Используя достаточный (с точки зрения статистической обработки) сейсмологический материал, задача сводится к выявлению периодической компоненты во временном ходе $\Delta K = K_2 - K_1$.



Рисунок 17 – А) Схематическое взаимное расположение регистрирующих станций и очага землетрясения в целях выявления приливных вариаций энергетического класса K .

Б) Карта расположения рассматриваемых сейсмостанций (треугольники) и землетрясений (круги).



Требования к используемому набору землетрясений предъявлялись следующие:

1. Эпицентр землетрясения и сейсмостанции должны находиться на одной прямой;
2. Землетрясения должны происходить в достаточно компактной области пространства, чтобы обеспечить близость сейсмических трасс;
3. Ограничение на длительность временного ряда *снизу*: он должен позволить провести рассмотрение различных приливных фаз и разделение приливных волн;
4. Ограничение на длительность временного ряда *сверху*: за рассматриваемое время напряженно-деформированное состояние среды не должно значительно меняться. Косвенным свидетельством этого можно считать отсутствие сильных землетрясений в рассматриваемой пространственной области.

В соответствии с этими требованиями для анализа были выбраны афтершоки землетрясения 21.06.1996 г. $M_W = 6.8$, зарегистрированные на сейсмостанциях “Кронки” и “Шипунский” (Рис. 17). Рассмотрены 147 землетрясений в диапазоне классов $K=8.9-11.0$.

На рис. 18 представлены вариации ΔK с периодами основных приливных волн. Амплитуда вариаций ΔK составила 0.15 ± 0.06 (период $T=12.4$ час., 12,7 час.), 0.09 ± 0.06 ($T=25.8$ час.) и 0.10 ± 0.06 ($T=24.0$ час.).

Для $\Delta K \approx 0.15$ сделана оценка соответствующих вариаций декремента. При расстоянии между станциями $L = 180$ км, скорости S -волны $V_S = 3 - 4$ км/с и ее частоты $f = 4 - 5$ Гц, такие изменения ΔK могут быть вызваны изменениями декремента $\Delta\theta \sim (6 \dots 10) \cdot 10^{-4}$ в среде между двумя сейсмостанциями.

Эта величина находится в диапазоне оценок $\Delta\theta$ для модели приливного эффекта в ВСШ и упомянутых в Главе 4 экспериментов по измерению приливных вариаций скоростей сейсмических волн. То есть приливные вариации именно параметров среды, в которой распространяются сейсмические волны, могут вызывать наблюдаемые вариации энергетических оценок землетрясений. Этот эффект может стать причиной (одной из причин) упомянутых выше особенностей появления приливных землетрясений в очаговых областях будущих сильных землетрясений. И здесь следует учесть особенности затухания сейсмических волн в очагах сильных землетрясений.

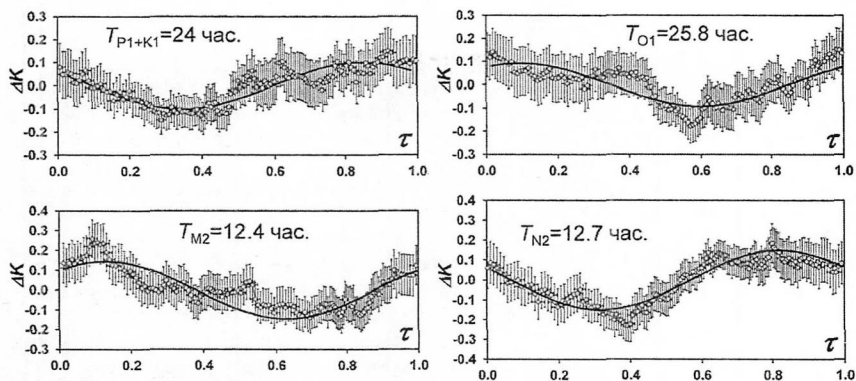


Рисунок 18 – Сглаженные вариации разности энергетических классов ΔK , определенных по данным двух сейсмостанций, как функция безразмерного параметра $\tau_i = t_i / T - \text{int}(t_i / T)$.

Приведены результаты для периодов, соответствующих приливным волнам $P_1 + K_1$, O_1 , M_2 и N_2 – 24.0, 25.8, 12.4 и 12.7 час. Сплошная линия соответствует аппроксимации синусоидой.

Известны⁵ изменения добротности среды Q в период подготовки сильных землетрясений с магнитудой $M \sim 8$: уменьшение Q оценивается по кода-волнам как $\approx 20\%$. Но эта оценка относится не к самому будущему очагу сильного землетрясения, а к существенно большему объему среды, захватываемому сейсмическими волнами, формирующими коду. Можно дать оценку вариаций параметров поглощения непосредственно в очаговой зоне, разделив интегральный эффект поглощения на две компоненты – поглощение в очаге готовящегося сильного землетрясения и поглощение в остальной части среды. В итоге получено увеличение декремента θ в готовящемся очаге сильного землетрясения в 3 – 4 раза. Используя полученное выше значение $\Delta\theta$ как фоновое, получена оценка ожидаемых приливных вариаций декремента в очаге $\Delta\theta \sim (2 \dots 4) \cdot 10^{-3}$.

Приняв значения $\Delta\theta = 0.004$, скорости S -волны $V_S = 3$ км/с, частоты $f = 5$ Гц, расстояния $R = 40$ км (радиус очаговой зоны землетрясения 21.06.1996 г. $M_W = 6.8$) получаем искажение класса землетрясений из будущей очаговой области сильного землетрясения $\Delta K = 0.23$.

Здесь нужно учесть важную особенность большинства методик анализа сейсмического режима. Как правило, рассматриваются землетрясения выше некоего энергетического порога (обычно, это уровень представительности каталога). “Приливные” ошибки в определении энергетического класса приводят к тому, что в зависимости от знака этой ошибки либо часть землетрясений с энергией выше реального уровня надежной регистрации исключается из рассмотрения, либо наоборот – землетрясения с более низким классом попадают в число рассматриваемых (Рис. 19). То есть при таком традиционном пороговом ограничении рассматриваемых землетрясений возникает ка-

⁵ Gusev A., Lenzikov V. Properties of scattered elastic waves in the lithosphere of Kamchatka: parameters and temporal variations // Tectonophysics. 1985. V. 112. P. 137–153.

жущийся эффект “приливных” вариаций потока землетрясений.

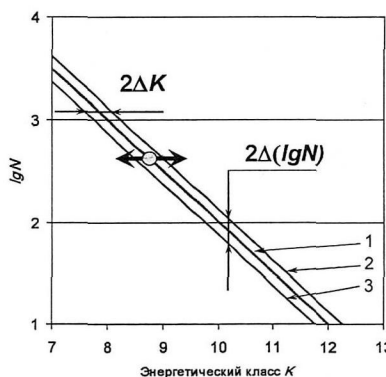


Рисунок 19 – Схема возникновения кажущегося приливного изменения потока землетрясений N при приливном искажении энергетического класса K на величину ΔK .

- 1 – зависимость числа землетрясений N от энергетического класса K в соответствии с законом Гутенберга-Рихтера;
- 2 – кажущееся увеличение потока N при приливном уменьшении декремента θ (то есть при повышении класса землетрясения на ΔK);
- 3 – кажущееся уменьшение потока N при приливном увеличении декремента θ (то есть при занижении класса землетрясения на ΔK).

Для значения $\Delta K = 0.23$ и согласно графику повторяемости землетрясений $\lg N = a - \gamma K$ с наклоном $\gamma = 0.5$ (среднее значение для Камчатки), получена оценка изменения потока землетрясений N в ≈ 1.3 раза в ту или иную сторону в зависимости от фазы прилива. Учитывая оценочный характер вышеприведенных построений, это соответствует приведенному на рис. 16 распределению землетрясений.

Полученные результаты демонстрируют возможность искусственного появления приливных эффектов в сейсмичности. При этом принципиальная возможность прямого триггерного эффекта в возникновении “приливных” землетрясений не исключается.

Заключение к Главе 6. Основным выводом Главы 6 является то, что применение к землетрясениям модели амплитудно-зависимой диссипации, объясняющей приливную модуляцию сейсмических шумов (Глава 4), дало приемлемое соответствие наблюдаемым эмпирически эффектам, что 1) является дополнительным аргументом в пользу адекватности модели, 2) подтверждает общность тенденций в проявлении отклика на приливное воздействие на различных масштабах сейсмического процесса, 3) позволило определить выявленную ранее приливную модуляцию землетрясений как вторичный эффект приливной модуляции поглощения в среде.

Основные результаты Главы 6 опубликованы в статьях [12, 14, 28].

В **Заключении** диссертации подводятся итоги работы и формулируются основные выводы.

В соответствии с поставленными задачами было проведено комплексное исследование ВСШ с целью изучения особенностей проявления отклика на приливное воздействие в сейсмоактивном регионе, спецификой которого является меняющееся напряженно-деформированное состояние среды. Как составные части в эту работу вошли теоретические и экспериментальные исследования. Причем экспериментальная часть включила как натурные, так и лабораторные этапы.

В ходе выполнения этого проекта были решены все поставленные задачи:

1. В пределах Курило-Камчатской островной дуги была организована регистрация

сейсмических шумов на базе узкополосных ($f=30$ Гц) высокочувствительных сейсмометров резонансного типа в четырех удаленных от источников антропогенной активности пунктах наблюдений: “Начики” и “Карымшина” (Камчатка), “Эримо” (о. Хоккайдо, Япония) и “Шикотан” (Курильские острова), – находящихся в различных геолого-тектонических условиях.

2. В течение 1987 – 2015 гг. были проведены режимные наблюдения ВСШ, не имеющие аналогов в сейсмологической практике. Полученные данные стали информационной основой для дальнейшего получения новых знаний об этом процессе. В настоящее время эти исследования могут рассматриваться как мониторинг ВСШ, в который входят ведение непрерывных долговременных наблюдений, обработка и анализ данных, еженедельная подготовка на их основе прогностических заключений о сейсмической обстановке для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

3. Экспериментально обнаружен эффект стабилизации фазы приливной компоненты ВСШ при подготовке сильного землетрясения, на основе которого была предложена методика прогноза сильных землетрясений..

4. В результате анализа этого эффекта (а) показана его *воспроизводимость*, под которой понимается идентичное поведение параметров ВСШ при подготовке идентичных сильных землетрясений; (б) получена эмпирическая зависимость порога “чувствительности” эффекта стабилизации фазы к эпицентральному расстоянию и магнитуде готовящегося землетрясения; (в) выявлены пространственные зоны, согласующиеся с тектоникой региона, землетрясения в которых предварялись стабилизацией фазы на близких значениях; (г) обнаружены сходные тенденции синхронизации приливной компоненты ВСШ и приливного потенциала в процессе подготовки землетрясений для Камчатки, Хоккайдо и Шикотана; (д) показано, что приливные эффекты, обнаруженные на $f=30$ Гц, проявляются и в более широком диапазоне частот.

На основании результатов 2.–4. сформулированы защищаемые положения 1 и 2.

1. Эффект приливной модуляции сейсмических шумов, имеющий следующие особенности: (i) нестабильность во времени; (ii) характерная глубина модуляции на уровне нескольких процентов; (iii) связь с напряженно-деформированным состоянием среды, отражаемым в подготовке сильных локальных землетрясений.

2. Новый тип параметрического предвестника землетрясений, характеризующийся стабилизацией фазового сдвига между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом.

5. Предложено объяснение известному уже более 30 лет, но не имевшему удовлетворительной интерпретации эффекту корреляции между приливными деформациями земной коры и наблюдающимися вариациями интенсивности сейсмических шумов. Модель приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов, обусловленной негистерезисным амплитудно-зависимым поглощением в земных породах, рассмотрена на реологическом и физическом уровнях. Для двух важнейших случаев (сухие и

флюидонасыщенные породы) показана принципиальная важность наличия в содержащихся в породе трещинах внутренних контактов.

6. Предложенный механизм объяснил ряд экспериментально обнаруженных особенностей приливной модуляции ВСШ: (а) глубина модуляции порядка первых процентов, (б) стабилизация фазы модуляции в период, предшествующий сильному землетрясению, (в) часто отмечаемое изменение фазы на противоположную после возникновения землетрясения.

На основании результатов 5.–6. сформулировано защищаемое положение 3.

3. Механизм приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов за счет модуляции размера области их сбора, обусловленной негистерезисным амплитудно-зависимым поглощением в земных породах, позволяющий дать объяснение ряду экспериментально обнаруженных особенностей ВСШ.

7. Проведенные лабораторные эксперименты по моделированию приливных эффектов в сейсмичности (одноосное сжатие образцов) показали существование амплитудной модуляции акустической эмиссии на стадии предразрушения образца в условиях малых периодических осцилляций деформации (превышение на три порядка медленно меняющейся фоновой деформации над модулирующей соответствует соотношению между тектонической и приливной деформациями).

8. Как в природе, где приливное воздействие существует всегда, так и в эксперименте модулирующее деформационное воздействие было активно в течение всего времени. Показано, что существуют интервалы времени, на которых эффект модуляции акустической эмиссии не наблюдается, что аналогично интервалам отсутствия синхронизации ВСШ с приливами. Наиболее ярко эффект модуляции прослеживается на завершающей стадии предразрушения – дилатантном разуплотнении. Однако модуляция была определена и на завершающей части упругих деформаций. Это согласуется с предвестниковым поведением ВСШ перед сильными локальными землетрясениями.

9. Проведены аналогии между приливной модуляцией сейсмического шума и корреляцией слабых землетрясений с приливами, включающие выявление общих свойств и соответствие одному физическому механизму. В качестве дополнения к общепринятому триггерному механизму корреляции землетрясений с приливами предлагается та же модель амплитудно-зависимой диссипации, примененная ранее для ВСШ.

10. Применение к сейсмичности модели амплитудно-зависимой диссипации, дает приемлемое соответствие наблюдаемым эмпирически эффектам, что, в свою очередь

1) является дополнительным аргументом в пользу адекватности модели амплитудно-зависимой диссипации,

2) подтверждает общность тенденций в проявлении отклика на приливное воздействие на различных масштабах сейсмического процесса,

3) позволяет рассматривать выявленную ранее приливную модуляцию землетрясений как вторичный эффект приливной модуляции поглощения в среде.

Все полученные результаты не противоречат друг другу и позволяют оценивать приливные эффекты в высокочастотных сейсмических шумах в сейсмоактивном регионе

как обоснованное с позиций физики и геофизики проявление отклика на периодическое воздействие в условиях меняющегося напряженно-деформированного состояния среды. Понимание физики возникновения выявленного предвестника сильных землетрясений придает ему новое качество, выводя из разряда эмпирической закономерности. А определение статистических параметров предвестника (достоверность, надежность, эффективность) позволяют его использовать для целей прогноза землетрясений.

СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ в журналах из списка рекомендованных ВАК

1. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. Воздействие прогрева земной поверхности на высокочастотный сейсмический шум // *Доклады АН СССР*. – 1991. – Т. 316. – № 1. – С. 85–88.
2. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Салтыков В.А., Синецын В.И. Первые результаты исследования высокочастотного сейсмического шума на Камчатке // *Вулканология и сейсмология*. – 1991. – № 1. – С. 104–111.
3. Gordeev E.I., Saltykov V.A., Sinitin V.I. and Chebrov V.N. Relationship between heating of the ground surface and high-frequency seismic noise // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1992. – Vol. 71. – P. 1–5.
4. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // *Доклады Академии наук*. – 1995. – Т. 340. – № 3. – С. 386–388.
5. Салтыков В.А. Возможные механизмы воздействия земных приливов на высокочастотный сейсмический шум // *Вулканология и сейсмология*. 1995. № 3. С. 81–90.
6. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // *Доклады Академии наук*. 1995. Т. 341. № 3. С. 406–407.
7. Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // *Вулканология и сейсмология*. – 1997. – № 4. – С. 73–83.
8. Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // *Известия РАН. Физика Земли*. – 1997. – № 3. – С. 39–47.
9. Чебров В.Н., Воропаева Н.П., Синецын В.И., Салтыков В.А. Универсальный микроконтроллер для геофизических исследований // *Сейсмические приборы*. – Вып. 28. – М.: ОИФЗ РАН. – 1997. – С. 26–30.
10. Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // *Доклады Академии наук*. – 1998. – Т. 361. – № 3. – С. 402–404.
11. Салтыков В.А., Касахара М., Гордеев Е.И., Окайма М., Синецын В.И., Такада М., Чебров В.Н. Составляющие высокочастотного сейсмического шума на мысе Эримо (о.Хоккайдо, Япония) // *Физика Земли*. – 2002. – № 2. – С. 83–91.
12. Салтыков В.А., Иванов В.В. Вариации статистических параметров сейсмичности, связываемых с земными приливами // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. – 2003. – № 1. – С. 130–134.
13. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синецын В.И., Чебров В.Н. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии // *Физика Земли*. – 2004. – № 2. – С. 66–81.
14. Салтыков В.А., Иванов В.В., Кугаенко Ю.А. Воздействие земных приливов на

- сейсмичность перед землетрясением 13 ноября 1993 года $M_w=7.0$ (Камчатка) // *Физика Земли*. – 2004. – № 7. – С. 25–34.
15. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998–2004 гг.) // *Вулканология и сейсмология*. – 2006. – № 4. – С. 3–13.
 16. Салтыков В.А., Чебров В.Н., Синуцын В.И., Кугаенко Ю.А., Касахара М. Организация наблюдений сейсмических шумов вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 3. С. 43–53.
 17. Saltykov V., Chebrov V., Kugaenko Yu., Sinitsyn V. High-frequency seismic noise: results of investigation in Kamchatka // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2006. – Vol. 31. – P. 132–137.
 18. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке) // *Физика Земли*. – 2007. – № 9. – С. 48–60.
 19. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Синуцын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – 2007. – № 1. – Вып. 9. – С. 37–50.
 20. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синуцын В.И., Шишкин А.А. Первые результаты исследования сейсмических шумов на о. Шикотан по данным долговременных наблюдений // *Тихоокеанская геология*. – 2008. – Т. 27. – № 3. – С. 33–43.
 21. Зайцев В. Ю., Салтыков В.А., Матвеев Л. А. О связи приливной модуляции сейсмических шумов с амплитудно-зависимыми потерями в горных породах // *Акустический журнал*. – 2008. – Т. 54. – № 4. – С. 621–628.
 22. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Синуцын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // *Вулканология и сейсмология*. – 2008. – № 2. – С. 110–124.
 23. Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Салтыков В.А. Подготовка Карымского сейсмо-вулканического кризиса в параметрах разномасштабной сейсмичности // *Вулканология и сейсмология*. – 2009. – № 3. – С. 27–37.
 24. Салтыков В.А., Синуцын В.И., Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А. Специализированная станция регистрации сейсмических шумов “Начики” в системе геофизического мониторинга Камчатки // *Сейсмические приборы*. – 2009. – Т. 45. – № 2. – С. 24–41.
 25. Салтыков В.А., Патонин А.В. Стадийность акустической эмиссии при лабораторном моделировании приливных эффектов в сейсмичности // *Доклады Академии наук*. – 2010. – Том 430. – № 5. – С. 693–696.
 26. Зайцев В.Ю., Салтыков В.А., Матвеев Л.А. Модуляция высокочастотных сейсмических шумов приливными деформациями: особенности эффекта перед сильными землетрясениями и предлагаемый физический механизм // *Физика Земли*. – 2011. – № 11. – С. 3–17.
 27. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями // *Тихоокеанская геология*. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 96–106.
 28. Салтыков В.А. Механизм приливных эффектов в сейсмичности на основе модели амплитудно-зависимой диссипации // *Физическая мезомеханика*. – 2014. – Т. 17. – № 5. – С. 103–110.

Подписано к печати 13.12.2016 г.
Тираж 100 экз. Заказ № 185
Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ