

*На правах рукописи*

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'Сол' followed by a flourish.

**СОЛОДЧУК Александра Андреевна**

**ПРЕД- И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК  
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

с. Паратунка, Елизовский р-н, Камчатский край –2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН)

Научный руководитель: Марапулец Юрий Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, с. Паратунка, Елизовский р-н, Камчатский край, заведующий лабораторией акустических исследований.

Официальные оппоненты: Сасорова Елена Васильевна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник лаборатории цунами.

Сычев Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, г. Бишкек, исполняющий обязанности заведующего лабораторией моделирования энергонасыщенных сред.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток.

Защита диссертации состоится «03» октября 2017 г. в 13-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайтах: [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru), [www.ikir.ru](http://www.ikir.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайтах [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru), [www.ikir.ru](http://www.ikir.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517, E-mail: [m.andreeva@imgg.ru](mailto:m.andreeva@imgg.ru), ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д999.004.03  
кандидат физико-математических наук,



М.Ю. Андреева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Твердые тела излучают упругие волны в ответ на динамическую перестройку их структуры. Это явление носит название - акустическая эмиссия. Основным механизмом ее возникновения является движение дислокаций и их скоплений. Неравномерность и прерывистость дислокационных процессов определяет импульсный характер излучения. Акустическая эмиссия находит широкое применение в геофизике, в частности при исследовании напряженно-деформируемого состояния пород, и в различных областях промышленности.

Исследования геоакустической эмиссии (ГАЭ) в сейсмоактивных регионах показывают, что на стадии подготовки землетрясений в характере акустического излучения могут возникать ярко выраженные изменения, которые зачастую наблюдаются в виде краткосрочного резкого повышения интенсивности эмиссии. Также необходимо учитывать, что в формирование структуры геоакустического сигнала определенный вклад вносят и длиннопериодные деформационные процессы, например, собственные колебания Земли, лунно-солнечные приливы, волны от удаленных землетрясений, поэтому актуальным является изучение фоновых характеристик эмиссии, в частности ее периодических составляющих.

В результате исследований ГАЭ на Камчатке выявлены аномальные возмущения в виде непрерывного повышения или квазипериодических пульсаций в интенсивности излучения в килогерцовом диапазоне частот, возникающие за несколько суток до готовящегося землетрясения [Купцов, 2005]. Они обусловлены усилением деформирования пород в пункте наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений [Деформационные и акустические предвестники, 2007]. В работе [Предварительные результаты сеймонаклономерных наблюдений, 2000] показано, что сильные удаленные землетрясения сопровождаются сильными сдвиговыми пред- и постсейсмическими деформациями. Согласно [Киссин, 2015] пред- и постсейсмические реакции геофизических полей тесно связаны между собой и обусловлены деформациями среды на различных стадиях сейсмического процесса. С учетом этого, аномальные возмущения в сигналах ГАЭ возможно будут наблюдаться также после землетрясений.

При подготовке землетрясений кроме аномальных изменений в интенсивности эмиссии наблюдаются ярко выраженные максимумы в ее направленности, обусловленные ориентацией источников излучения в поле напряжений пород [Шевцов и др., 2010]. Ранее при исследовании направленных свойств высокочастотной геоакустической эмиссии рассматривались ее особенности в фоновые (спокойные) периоды и во время деформационных возмущений, связанных с подготовкой удаленных землетрясений. Поскольку релаксация поля локальных напряжений в пункте наблюдений происходит еще некоторое время после землетрясений, актуальным является исследование характера направленности и после них.

Данная работа посвящена исследованию отклика высокочастотной геоакустической эмиссии на усиление и последующую релаксацию поля напряжений в пункте наблюдения, связанных с землетрясением.

**Предмет исследования** – высокочастотная геоакустическая эмиссия.

**Целью работы** является исследование отклика высокочастотной геоакустической эмиссии на подготовку землетрясений и последующую релаксацию остаточных напряжений в пункте наблюдений.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить аналитический обзор современного состояния исследований в области акустической эмиссии.
2. Исследовать характеристики геоакустической эмиссии, в том числе периодические составляющие, в фоновые периоды и при активизации деформационных процессов.
3. Исследовать изменения направленности геоакустической эмиссии в условиях спокойной погоды перед готовящимися землетрясениями и после них.
4. Проанализировать статистику появления пред- и постсейсмических аномальных возмущений геоакустической эмиссии в 2008–2016 гг.

**Научная новизна работы**

Исследованы изменения направленности высокочастотного геоакустического излучения перед землетрясениями и при последующей релаксации полей локальных напряжений. Впервые в сейсмоактивном регионе обнаружены изменения азимутального распределения геоакустических импульсов не только перед землетрясениями, но и после них. Получена статистика появления пред- и постсейсмических аномалий в азимутальном распределении геоакустической эмиссии в 2008–2016 гг. Создана база данных направленности излучения в спокойные периоды и при активизации деформационных процессов, обусловленных землетрясениями. Обнаружена связь между суточными вариациями температуры воздуха и высокочастотной геоакустической эмиссии.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено наличие ярко выраженных максимумов в направленности высокочастотного геоакустического излучения во время активизации деформационных процессов, обусловленных подготовкой землетрясений и последующей релаксацией остаточных напряжений в пункте наблюдений.
2. Выявлены статистические закономерности появления пред- и постсейсмических аномалий направленности высокочастотной геоакустической эмиссии, связанные с камчатскими землетрясениями в 2008–2016 гг.
3. Выявлена акустоэмиссионная составляющая с периодом 24 ч, обусловленная термодформацией приповерхностных осадочных пород при суточных изменениях температуры.

**Достоверность** результатов обеспечивается надежностью использованной аппаратуры и её систематической калибровкой, большой длительностью наблюдений, качеством и представительным объемом экспериментальных данных, стандартными методиками обработки данных.

**Обоснованность** результатов подтверждается их согласованностью и непротиворечивостью результатам исследований, проводимых по смежной тематике; обеспечивается применением основных положений теории упругости, векторно-фазовых методов в акустике, современных методов сбора информации, статистических методов обработки и анализа данных.

**Практическая ценность работы**

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами работ ИКИР ДВО РАН, Программами фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», проектом ОФН РАН № 12-I-ОФН-17, проектами ДВО РАН № 09-

III-A-02-043, № 12-III-A-07-107, фундаментальными исследованиями молодых ученых (до 35 лет включительно) № 10-III-B-02-021.

Результаты исследования могут быть использованы для развития акустических методов исследования природных сред, изучения характеристик деформационных процессов, создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности, в геофизике и гидроакустике.

Оригинальность разработанных автором программных продуктов подтверждена свидетельствами о регистрации электронного ресурса № 10029 от 21.02.2008 и № 19789 от 24.12.2013, свидетельствами о регистрации базы данных № 2015620747 от 14.05.2015 и № 2016621676 от 19.12.2016

Результаты исследования суточной составляющей высокочастотной геоакустической эмиссии признаны одним из важнейших научных достижений, полученных Институтами, объединяемыми Научным советом по физике солнечно-земных связей (Совет «Солнце – Земля»), в 2016 г. в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований.

### **Личный вклад**

Автор работы выполнила анализ направленности геоакустических сигналов в периоды активизации деформационных процессов и оценила статистику изменчивости направленности акустического излучения. Участвовала в теоретическом обосновании наблюдаемых эффектов. Разработала методику и программное обеспечение для автоматизированного выделения суточных вариаций высокочастотной геоакустической эмиссии, а также исследовала суточную составляющую эмиссии. Принимала непосредственное участие в создании баз данных, содержащих сведения о характеристиках сигналов геоакустической эмиссии. Самостоятельно и вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы.

### **Апробация работы**

Результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ИКИР ДВО РАН, а также следующих научных мероприятиях: 9<sup>th</sup> International Conference «Problems of Geocosmos» (St. Petersburg, Petrodvorets, 2012); VI и VII международных конференциях «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, 2013, 2016 гг.); XIII и XIV Конференциях молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», проводимых в рамках Международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2013, 2016 гг.); XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2013 г.); I Всероссийской акустической конференции (г. Москва, 2014 г.); VI Сахалинской молодежной научной школе «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (г. Южно-Сахалинск, 2016 г.); XXII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2016 г.); XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн (РРВ-25)», (г. Томск, 2016 г.); II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества (г. Нижний Новгород, 2017 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 2 в реферируемых журналах списка ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом WoS; 4 статьи в журналах, индексируемых РИНЦ, 2 свидетельства о регистрации

электронного ресурса, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных; 17 работ в материалах научных мероприятий.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 72 наименования, и приложения. Работа содержит 113 листов машинописного текста, 42 рисунка, 6 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** определены актуальность темы исследований, предмет исследования, цель и задачи, новизна работы, практическая ценность и личный вклад автора. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор современного состояния исследований в области акустической эмиссии, рассмотрено ее применение в геофизике.

*В разделе 1.1* показано, что основными причинами возникновения акустической эмиссии являются процессы пластической деформации, связанные с появлением и развитием дефектов кристаллической решетки твердого тела (дислокаций), возникновение и развитие микро- и макротрещин, фазовые превращения, процессы трения. Движение дислокаций и их скоплений является одним из главных физических механизмов генерации АЭ. Неравномерность и прерывистость дислокационных процессов определяет импульсный характер эмиссии [Ультразвук, 1979]. Форма импульсов акустической эмиссии зависит от природы процесса и свойств среды. Так, при возникновении и движении дислокаций и их скоплений, трещинообразовании характерны релаксационные импульсы с крутым фронтом и плавным спадом [Ермолов и др., 1991].

Излучение упругих волн в окружающую среду при изменении формы или скорости дислокаций рассмотрено в рамках теории упругости на примере распространения упругих колебаний в твердом теле. Описаны характеристики упругих волн (изменение напряжения, смещение частиц, потенциал смещения и деформация). Рассмотрена связь между напряжениями и деформациями. Перечислены основные характеристики акустической эмиссии.

*В разделе 1.2* рассмотрено применение явления акустической эмиссии на разных пространственных масштабах и соответствующих им длинам волн в геофизике и промышленности. Обсуждаются акустические колебания в различных диапазонах частот и средства их регистрации. Описаны задачи геофизики и промышленности, для решения которых применяется акустическая эмиссия.

Для получения сигналов землетрясений, оценки их характеристик, мониторинга взрывов, а также в сейсмической разведке [Аки, Ричардс, 1983] используются колебания в сейсмическом диапазоне частот (доли – единицы герц). Обычно в качестве датчиков здесь выступают сейсмографы – приборы, установленные на земной поверхности, регистрирующие смещения ее точек при землетрясениях или взрывах.

Для исследования длиннопериодных деформационных процессов [Рыкунов и др., 1979], предвестников сильных землетрясений [Предвестники сильных землетрясений ..., 2008], поиска и разведки залежей полезных ископаемых [Шериф, Гелдарт, 1987] применяются геоакустические сигналы в диапазоне первых десятков герц (высокочастотные сейсмические шумы – ВСШ). Для их регистрации используются резонансные узкополосные вертикальные сейсмометры с чувствительным элементом в виде пьезокерамической пластины [Рыкунов и др., 1978].

В штольнях и скважинах различной глубины для исследования и контроля изменения напряженного состояния геосреды проводятся акустические наблюдения в частотном диапазоне от десятков герц до нескольких килогерц. Для регистрации колебаний используются приемники с магнитоупругим преобразователем [Беляков, Николаев, 1995; Гаврилов и др., 2006].

Относительно недавно для исследования приповерхностных осадочных пород стали использовать высокочастотные геоакустические сигналы (в частотном диапазоне от нескольких единиц до первых десятков килогерц) [Купцов, 2005]. Их регистрация осуществляется с помощью гидрофонов — пьезокерамических преобразователей, размещенных в закрытых водоемах на суше.

Для исследования механизма трещинообразования в материале [Виброупругость акустопластика и акустическая эмиссия, 2001], например, на образцах горных пород, применяется метод акустоэмиссионного контроля в ультразвуковом диапазоне частот (от десятков килогерц до десятков мегагерц). Колебания в этом же диапазоне широко применяются в промышленности, например, для неразрушающего контроля объектов.

*Раздел 1.3* посвящен результатам исследований акустической эмиссии в широком диапазоне частот в сейсмоактивных регионах в периоды подготовки землетрясений. Так, в серии работ по исследованию высокочастотного сейсмического шума (10–60 Гц) [Предвестники сильных землетрясений ..., 2008] на Камчатке показано, что перед сильными землетрясениями с магнитудой  $M \geq 6.0$  на эпицентральной расстоянии до 250 км наблюдается стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ на определенном уровне в течение нескольких месяцев, а после землетрясения происходит ее резкое изменение. В результате совместного анализа сейсмических событий в Тихом океане в районе Камчатки и гидроакустических сигналов на частотах 40–110 Гц, полученных с помощью плоской гидроакустической антенны [Морозов, Сасорова, 2003], установлено, что перед землетрясениями появляется высокочастотный сейсмический шум.

Аномальное возмущение акустического сигнала в диапазоне 800–1200 Гц, возникшее за 16 часов до катастрофического Спитакского землетрясения с магнитудой  $M=7.1$ , произошедшего в Армении в 1988 г., описано в работе [Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения, 1991]. Аномалия наблюдалась в течение нескольких дней, сопровождая активную афтершоковую деятельность. В Японии, в главном тоннеле Сейсмологической Обсерватории Мацуширо в 1996–1998 гг., регистрировалось повышение интенсивности АЭ на частотах 30–1000 Гц, начинающееся приблизительно за 12 ч перед землетрясениями с магнитудой  $M_s \geq 3.0$  и спадающее после них подобным образом [Отклик акустической эмиссии ..., 2001]. На Камчатке в скважине на глубине 1035 м регистрировались нарушения суточного хода ГАЭ и бухтообразные аномалии среднесуточного уровня геоакустического излучения в диапазоне 30–1200 Гц перед землетрясениями с магнитудой  $M_{LN} \geq 5.0$  [Гаврилов и др., 2006].

Перед сильными камчатскими землетрясениями с энергетическими классами  $K_s \geq 11.0$  наблюдается многократное увеличение амплитуды сигнала над фоновым уровнем в частотном диапазоне 3–6 кГц (здесь и далее по тексту приведены оперативные данные по землетрясениям Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», для энергетической классификации землетрясений использовались классы  $K_s$  по шкале С.А. Федотова). Аналогичное поведение акустической эмиссии перед землетрясениями зарегистрировано в Италии [«Storms of crustal stress» ..., 2010], но уже на частотах 25–30 кГц.

На основании проведенного обзора сделаны *выводы по главе 1* о применимости звукового диапазона от нескольких единиц до первых десятков килогерц для решения задач диагностирования природных сред, в том числе при исследовании процессов подготовки и развития землетрясений. Показана целесообразность проведения исследований характеристик высокочастотной геоакустической эмиссии при подготовке землетрясений и последующей релаксации остаточных напряжений в пункте наблюдений.

Во **второй главе** рассмотрены системы регистрации геоакустической эмиссии, их применимость, характеристики акустического излучения в фоновые периоды и при активизации деформационного процесса.

В *разделе 2.1* описан аппаратно-программный комплекс для проведения одновременных наблюдений разнородных геофизических полей, развернутый в пункте «Микижа» на Камчатке. Для регистрации широкополосных геоакустических сигналов используются две гидроакустические системы, установленные у дна природного водоема.

Наблюдаемые геоакустические сигналы генерируются сдвиговыми источниками с размерами от миллиметров до единиц метров, расположенными на расстоянии от 18 до 37 м от приемников [Купцов и др., 2005; Шевцов и др., 2010]. Прием генерируемого в грунте сигнала эмиссии осуществляется в жидкой среде. На границе раздела двух сред возникает преломление акустической волны. Коэффициент преломления при переходе продольных колебаний из осадочных пород в воду составляет примерно от 1.2 до 1.7. С учетом небольших размеров контролируемого пространства эффектами преломления можно пренебречь. По результатам георадиолокационных исследований [Пинегина, 2006], проведенных на озере Микижа в районе установки измерительных систем «...мощность слаболитифицированных рыхлых отложений в озере в среднем составляет 3–4 м». Это в несколько раз меньше размера области, в пределах которой находятся сдвиговые источники регистрируемых сигналов. Толщина слоя «жидкого ила» в точках установки регистрирующих систем не превышает 5 см, а приемники находятся в воде примерно на 10 см выше его. Согласно натурным экспериментам [Войтенко, Моргунов, 2011], акустическая волна частотой 2500 Гц «...распространяется без дополнительных потерь и искажений в волноводе, состоящем из водного слоя и как минимум сорока сантиметрового слоя песчаного жидкого грунта на расстояние до 2 км». Таким образом, ослаблением уровня геоакустических сигналов за счет илистых отложений на дне озера Микижа можно также пренебречь.

Одна из приемных гидроакустических систем состоит из совмещенных на одном корпусе ориентированных по сторонам света направленных пьезокерамических гидрофонов. Она используется для регистрации акустических сигналов в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 11 кГц. Вторая система построена на базе инерционного комбинированного приемника и преимущественно используется для исследования пространственной структуры сигналов ГАЭ [Марапулец, Шевцов, 2012]. Комбинированный приемник объединяет в себе сферический преобразователь акустического давления и трехкомпонентный приемник градиента давления, датчики которого расположены вдоль взаимно ортогональных направлений.

Сигналы с выходов приемных систем после усиления оцифровываются с частотой дискретизации 48 кГц и записываются на жесткий диск персонального компьютера в стандартном формате звуковых файлов WAVE. После чего с использованием параллельных вычислений на графических процессорах производится частотно-временная обработка записанных данных. В ходе нее осуществляется цифровая

фильтрация в семи частотных поддиапазонах: 0.1–10, 30–60, 70–200, 200–600, 600–2000, 2000–6500, 6500–11000 Гц с последующим детектированием, интегрирование и синхронной записью отсчетов с частотой 1 Гц по каждому из каналов гидроакустических систем. Также, в автоматическом режиме производится анализ потока геоакустических импульсов, определение их направленности [Марапулец, Щербина, 2008] и частотно-временной анализ сигналов с применением разреженной аппроксимации [Марапулец и др., 2014].

Для оценки деформаций пород в пункте наблюдений предусмотрена регистрация наклона земной поверхности с помощью инклинометра (наклономера) Leica Nivel 220. Рядом с ним установлена цифровая метеостанция Conrad WS-2300 для учета влияния метеоусловий на геоакустическое излучение. Также с августа по сентябрь 2013 г. в непосредственной близости от гидрофона был установлен датчик для измерения температуры воды в озере.

*Раздел 2.2* посвящен описанию геоакустических сигналов в диапазоне частот от 0.1 до 11000 Гц при различных уровнях деформаций. Рассмотрены фрагменты сигналов и их спектров. Приведены результаты анализа этих сигналов.

Сигналы деформационной природы возникают в результате локального изменения напряженно-деформированного состояния приповерхностных осадочных пород в пункте наблюдений. Все их разнообразие складывается из различных комбинаций релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. В фоновые периоды частота следования импульсов составляет 0.1–0.5 импульсов в секунду (рисунок 1а), а в моменты увеличения скорости деформаций, в том числе и перед землетрясениями, она может достигать десятков и даже сотен в секунду (рисунок 1б).

Представлены примеры аномалий, наблюдаемые в сигналах ГАЭ, прошедших частотно-временную обработку. При активизации деформационного процесса, в том числе перед землетрясениями и после них, наблюдаются аномальные всплески в интегральном сигнале в килогерцовых диапазонах частот: от 2000 и более Гц, реже в диапазоне от 600 до 2000 Гц. Они могут проявляться в виде повторяющихся пульсаций, либо резкого продолжительного увеличения уровня акустических шумов.

*В разделе 2.3* приведены результаты анализа периодических составляющих высокочастотного геоакустического излучения. Показано, что в акустическом сигнале присутствует суточная вариация с максимумом в 4–5 ч UT (дневное время в месте

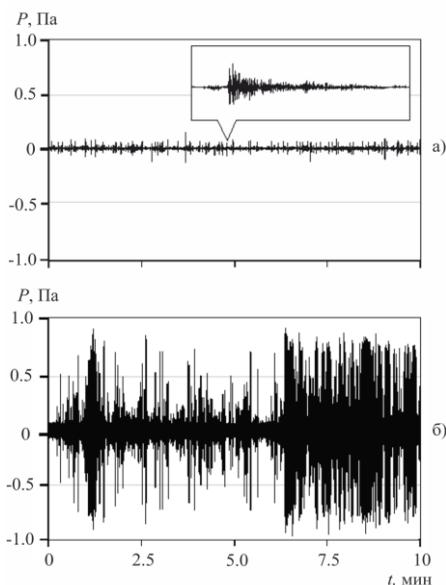


Рисунок 1 – Десятиминутные фрагменты записи акустических сигналов в фоновый период (а) (на выноске одиночный импульс) и при увеличении скорости деформаций (б).  $P$  – акустическое давление

регистрации), которая наиболее ярко выражена в частотном поддиапазоне от 2.0 до 6.5 кГц.

Построены периодограммы фрагментов данных, очищенных с помощью вейвлет-преобразования от мешающих шумов, в спокойные от сильных возмущений периоды. Их анализ показал, что периодичность суточной вариации составляет 24 ч (с точностью 1 ч). Других периодических составляющих выделено не было.

Для уточнения периода суточной составляющей геоакустической сигнал сравнивался с эталонными синусоидами с периодами, соответствующими наиболее мощным суточным приливным волнам (23.93 ч – лунная деклинационная волна  ${}^m K_1$ ; 24.07 ч – солнечная главная  $P_1$ ; 25.82 ч – лунная главная  $O_1$ ), и с периодом ровно 24 ч. При анализе использовались участки данных длительностью 30 суток. Исследуемый и эталонный сигнал накладывались друг на друга, рассчитывалась взаимная корреляционная функция за последние (тридцатые) сутки, после чего оценивался сдвиг сигналов относительно друг друга. В результате установлено, что периодичность суточной вариации составляет ровно 24 ч.

Исследование суточной составляющей высокочастотной ГАЭ проводилось в период с января 2006 г. по сентябрь 2013 г. Суточная вариация наблюдалась в течение всего временного промежутка с незначительными перерывами, так же регистрировались периоды (таблица 1), когда амплитуда вариации существенно увеличивалась, другими словами наблюдался ярко выраженный суточный ход эмиссии. Этот эффект наблюдался в летние периоды, когда устанавливалась среднесуточная температура не ниже  $10^\circ \text{C}$ .

Проведено исследование влияния землетрясений и неблагоприятных метеоусловий на поведение суточного хода геоакустической эмиссии. Для 163 землетрясений с энергетическими классами  $K_s \geq 11.0$  на эпицентральных расстояниях до 350 км рассматривались изменения амплитуды суточной вариации в трехсуточном интервале до и после землетрясения. Почти в 85% случаев связи между исследуемыми процессами выявлено не было, а в остальных 15% – резкое изменение амплитуды суточной составляющей происходило при существенных вариациях температуры воздуха. Наличие осадков, усиление ветра, резкое изменение атмосферного давления также не оказывали существенного влияния на характер суточных вариаций ГАЭ.

В результате корреляционного анализа между вариациями суточной составляющей геоакустической эмиссии и температуры была выявлена тесная связь. Коэффициенты корреляции в зависимости от выбранного временного периода варьировались от 0.85 до 0.97 при уровне значимости 0.05. Из рисунка 2 видно, что формы суточных вариаций температуры воздуха  $T$  и акустического давления  $P_s$  практически совпадают, при этом

наблюдается небольшая задержка хода геоакустического излучения по времени. Изменение температуры воды  $T_w$  около датчика геоакустической эмиссии в результате прогрева озера приводит к изменению формы суточной составляющей акустического давления на стадии уменьшения после максимальных значений, но не обуславливает ее появление (вкладка на рисунке 2).

Таблица 1 – Периоды наличия ярко выраженного суточного хода эмиссии

Год	Период
2006	27 июня – 10 сентября
2007	16 июля – 17 сентября
2008	10 августа – 03 сентября
2009	06 – 16 июля, 01 – 28 августа
2010	16 июня – 31 августа
2011	19 июля – 07 сентября
2012	15 июня – 12 августа
2013	12 июля – 11 сентября

Сформулирован вывод о том, что термодформации пород (колебания приповерхностных осадочных пород, в которых генерируется геоакустическая эмиссия, под влиянием суточной разницы температур) являются наиболее вероятной причиной выявленной связи между вариациями температуры воздуха и геоакустической эмиссии в диапазоне от 2.0 до 6.5 кГц.

Для подтверждения этого эффекта было проведено сравнение суточной вариации геоакустического излучения с периодической составляющей наклона земной поверхности  $\alpha$ . Период суточной составляющей наклона земной поверхности определен по выше-описанной методике и равен 24 ч, наиболее ярко суточная вариация выражена в июне–сентябре, что практически совпадает с периодами ярко выраженного суточного хода геоакустической эмиссии при установившейся максимальной среднесуточной температуре.

Основные **выводы по главе 2** следующие. В спокойные периоды акустический сигнал, зарегистрированный с помощью гидрофонов, установленных у дна природного водоема, представляет собой серию довольно редких, незначительных по амплитуде импульсов. При активизации деформационного процесса, в том числе перед землетрясениями и после них, наблюдаются увеличение как амплитуды импульсов, так и их количества в единицу времени, а также аномальные всплески в интегральном сигнале в полосе частот свыше 2 кГц. В сигнале высокочастотной геоакустической эмиссии (2.5–6 кГц) присутствует вариация с периодом 24 ч, обусловленная термодформациями пород в пункте наблюдений. Она наиболее ярко выражена в летние месяцы, когда среднесуточная температура воздуха устанавливается не ниже 10° С. Периодических составляющих, соответствующих суточным и полусуточным приливным волнам, а также аномальных изменений суточной вариации эмиссии перед сильными землетрясениями и после них не выявлено.

**Третья глава** посвящена исследованию активности и ее азимутального распределения высокочастотной геоакустической эмиссии перед готовящимися землетрясениями и в течение некоторого времени после них.

В *разделе 3.1* рассмотрено волновое движение в жидкости, приведено описание методов определения направления на источник звука, применяющихся в рамках векторно-фазового подхода. Поток импульсов геоакустической эмиссии регистрируется гидроакустическими системами, размещенными у дна водоема. Из-за отсутствия

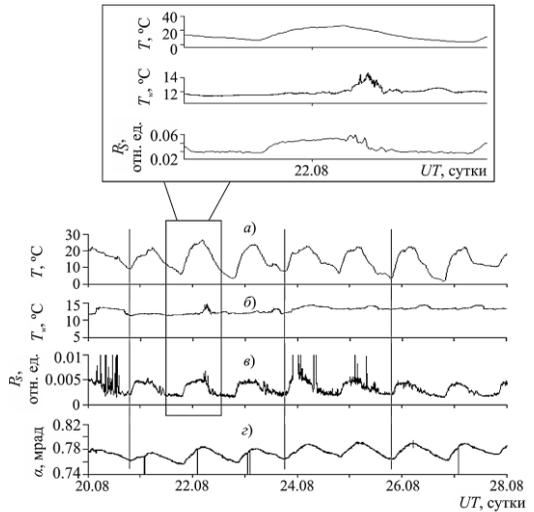


Рисунок 2 – Фрагмент регистрации температуры воздуха  $T$  (а), температуры воды в озере  $T_w$  (б), накопленного на секундном интервале акустического давления  $P_s$  в диапазоне частот от 2.0 до 6.5 кГц (в), наклона земной поверхности  $\alpha$  (г) в период с 20 по 28 августа 2013 г. Вертикальными линиями отмечено начало роста суточной температуры воздуха  $T$ . Во вкладке вверху показан выделенный в прямоугольник участок

упругости формы в жидкостях акустическое поле в них имеет более простой вид по сравнению с полем в твердой среде. Волновое движение в жидкости описывается изменением акустического давления  $P$  или плотности  $\rho$  и вектором скорости колебательного движения  $\mathbf{V}$  [Ермолов и др., 1991]. При этом колебания представляют собой смещения частиц среды («физически» бесконечно малого объема среды).

Используя уравнение Эйлера и оценивая акустическое давление через потенциал колебательной скорости  $\Phi(x, y, z, t)$ , получим [Гордиенко, 2007]:

$$P = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

откуда следует, что пространственное распределение звукового давления тождественно распределению потенциала колебательной скорости. Если известна функция  $\Phi$ , можно определить ее градиенты в любых направлениях и получить сведения о структуре векторных величин поля и, соответственно, определить направление движения волны.

Одним из подходов к определению направления прихода звуковой волны является использование комбинированных приемников, которые синхронно регистрируют акустическое давление  $P(t)$  и три взаимно ортогональных компоненты его градиента  $\nabla P_x(t)$ ,  $\nabla P_y(t)$ ,  $\nabla P_z(t)$ , равные проекциям вектора градиента давления на соответствующие оси координат. Применяя векторно-фазовые методы [Гордиенко, 2007] к этим четырем сигналам, можно восстановить пространственно-временное распределение вектора колебательной скорости  $\mathbf{V}$  частиц среды в акустической волне.

Исследование направленных свойств высокочастотной геоакустической эмиссии проводится на основе данных, полученных гидроакустической системой, построенной на базе комбинированного приемника. Так как амплитуда зарегистрированных импульсов существенно превышает уровень шумов, для исследования направленности их распределения удобно применять амплитудный метод. Зная амплитуды компонентов  $P$ ,  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$  сигнала, полярный угол  $\vartheta$  и азимут  $\varphi$  направления на источник можно найти, используя соотношения [Гордиенко, 2007]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{V_y}{V_x}, \quad \operatorname{tg} \vartheta = \pm \sqrt{\frac{V_x^2 + V_y^2}{V_z^2}}.$$

Неоднозначность определения направления, возникающая в силу симметрии характеристик направленности векторных каналов, устраняется применением канала давления. Для этого используются значение разности фаз или знак взаимной корреляции между каналами давления и колебательной скорости, или градиента давления в некоторых конструкциях векторных приемников.

Согласно амплитудному методу точки сигнала отображаются в декартовой системе координат. При этом отсчеты отдельных импульсов группируются в ограниченной области, которую можно описать эллипсом. Направление прихода звуковой волны соответствует положению главной оси эллипса. Для высокоточного определения пеленга на источник излучения разработан метод автоматизации [Марапулец, Щербина, 2008]. В нем по форме огибающей сигнала определяется его вступление. По максимальным значениям огибающей находится амплитуда импульса. Затем в определенном интервале амплитуд  $dA$  выделяются геоакустические импульсы и определяется их направленность. Рассмотрение импульсов только в выделенном интервале амплитуд является достаточным для исследования направленности геоакустических сигналов [Марапулец, Шевцов, 2012].

Раздел 3.2 посвящен описанию результатов анализа распределения потока геоакустических импульсов по направлениям в периоды отсутствия деформационных и метеорологических возмущений, а также во время роста интенсивности акустического излучения перед землетрясениями.

При исследованиях направленных свойств геоакустического излучения используются понятия активности геоакустической эмиссии  $\Omega(t)$  и ее азимутального распределения  $D(\alpha, t)$ . Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов в определенном интервале амплитуд  $dA$ , а вторая – азимутальное распределение регистрируемого потока импульсов по направлениям  $d\alpha$ . Гистограмма азимутального распределения  $D(\alpha)$  отображается в полярных координатах, где расстояние от центра координат до точки пространства с углом  $\alpha$  равняется значению  $D(\alpha, t)$ . Также строится трехмерный график азимутального распределения  $D(\alpha, t)$  в декартовых координатах, где по оси абсцисс откладывается время, по оси ординат – азимуты, яркость графика характеризует усредненное в 15 минутном окне количество импульсов, зарегистрированных по какому-либо направлению. При построениях углы группируются в интервалы по  $5^\circ$ .

В результате непрерывных наблюдений установлено, что поведение геоакустической активности хорошо аппроксимируется синусоидой, максимум которой приходится на осенние месяцы, а минимум – на весну. Также на фоне плавных сезонных изменений возникают кратковременные (длительностью до нескольких суток) интенсивные возмущения, обусловленные активизацией деформационных процессов.

В фоновые периоды распределение геоакустических импульсов по направлениям достаточно равномерное. На рисунке 3 представлены диаграммы азимутального распределения акустической активности, усредненной в суточном интервале, за периоды: ноябрь 2007 г. - февраль 2008 г. (рисунок 3а) и май - июнь 2008 г. (рисунок 3б). При построении диаграмм не учитывались дни, когда присутствовали деформационные

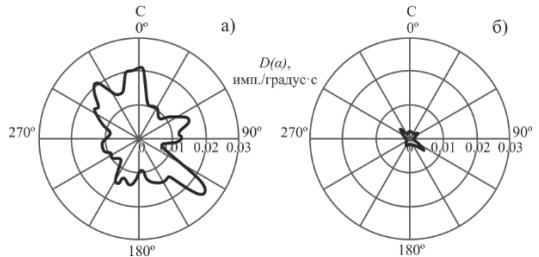


Рисунок 3 – Диаграммы азимутального распределения геоакустической активности  $D(\alpha)$  в фоновые периоды

и атмосферные возмущения. Средняя акустическая активность  $\Omega(t)$  в эти периоды составила 0.63 и 0.14 имп./с соответственно. В обоих случаях регистрировалась повышенная активность с юго-восточного и северо-западного направлений, структура лепестков диаграмм во многом повторялась. Отличия в активности имели сезонный характер. По множеству нерегулярно расположенных максимумов излучения можно судить о сложном характере напряжений, действующих в периоды регистрации эмиссии, а по асимметрии их расположения можно сделать вывод о неоднородности свойств среды вокруг точки наблюдений.

В периоды активизации деформационных процессов, в частности, обусловленных землетрясениями, наблюдается увеличение акустической активности и диаграммы ее азимутального распределения существенно изменяются: в них появляются ярко

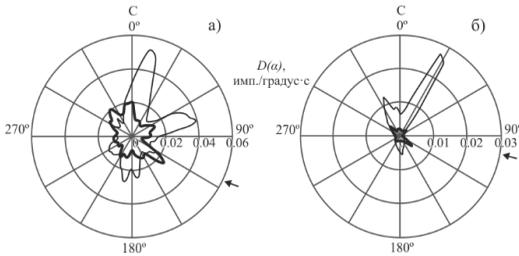


Рисунок 4 – Диаграммы азимутального распределения активности эмиссии  $D(a)$  (тонкая линия), усредненной в суточном окне перед землетрясениями 15 декабря 2007 г. (а) и 15 мая 2008 г. (б). Толстая линия – фоновый уровень активности эмиссии. Стрелки показывают азимут землетрясения

$\varphi = 100^\circ$ . В обоих случаях неравномерность распределения потока геоакустических импульсов по направлениям увеличилась, максимальные уровни активности приходились на направления  $15^\circ$  и  $30^\circ$ , которые наблюдались и в спокойные периоды, но не выделялись сильно над средним уровнем.

В разделе 3.3 приведены результаты исследований направленности геоакустической эмиссии во время землетрясений в период с августа 2008 г. по декабрь 2016 г.

Для исследования пред- и постсейсмического изменения направленности геоакустического излучения были отобраны 339 землетрясений, произошедших в период с августа 2008г. по декабрь 2016 г. с энергетическими классами  $9.0 < K_s \leq 10.0$ ,  $10.0 < K_s \leq 11.0$ ,  $11.0 < K_s \leq 12.0$  и  $K_s > 12.0$  и эпицентрными расстояниями  $R \leq 120$  км,  $R \leq 190$  км,  $R \leq 240$  км и  $R \leq 350$  км соответственно. Такие характеристики землетрясений приняты в соответствии с [Добровольский, 1984] и скорректированы по результатам натурных исследований [Кущов, 2005]. Землетрясения, произошедшие с 10 февраля по 09 июля 2013 г., не рассматривались при анализе из-за отсутствия геоакустических данных в указанный период.

В условиях спокойной погоды (слабо меняющееся давление, отсутствие осадков и ветра больше 6 м/с) в интервале  $\pm 5$  суток в окрестности землетрясения рассматривались величина акустической активности и ее азимутальное распределение. Считалось, что в направленности геоакустического излучения наблюдаются аномалии, связанные с сейсмическим событием, когда в вышеуказанном временном интервале частота следования геоакустических импульсов и ее распределение по какому-либо одному или нескольким отдельным направлениям превышают значения соответствующих фоновых уровней в 2.5 и более раз. Фоновые уровни принимались по результатам предварительного анализа ряда многолетних наблюдений акустической активности.

Установлено наличие аномалий направленности геоакустического излучения в окрестности 251 землетрясения из 339, что составляет 74%. При анализе изменчивости направленности геоакустического излучения учитывались аномалии направленности, наблюдающиеся в окрестности только одного землетрясения. Они были зарегистрированы в 82-х случаях. Длительность таких аномалий варьировалась в диапазоне от 10 до 50 ч, а повышенная активность регистрировалась в основном с направлений, соответствующих азимутам  $50^\circ$ ,  $155^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $320^\circ$ . Анализ

выраженные максимумы по отдельным направлениям. На рисунке 4 представлены диаграммы азимутального распределения геоакустической активности, усредненной в суточном интервале перед землетрясениями 15 декабря 2007 г. в 09:00 UT (рисунок 4а): координаты эпицентра –  $52.34^\circ$  N,  $160.61^\circ$  E, энергетический класс  $K_s=11.6$ , эпицентральное расстояние  $R=175$  км, азимут  $\varphi = 110^\circ$ , и 15 мая 2008 г. в 05:49 UT (рисунок 4б): координаты эпицентра –  $52.7^\circ$  N,  $160.06^\circ$  E,  $K_s=11.1$ ,  $R=127$  км,

продолжительности аномалий направленности геоакустического излучения в окрестности сейсмических событий показал, что они возникали за 10–30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжались в течение 6–20 ч после него.

Связи между длительностью аномалий и классами землетрясений, а также эпицентрными расстояниями выявлено не было. Коэффициенты корреляции этих величин составили минус 0.04 и 0.01 при уровнях значимости 0.7 и 0.9 соответственно.

На рисунке 5 показан пример аномалии, зарегистрированной за 30 ч перед землетрясением с энергетическим классом  $K_s=10.3$ , произошедшим 17 декабря 2012 г. в 03:10 UT (координаты эпицентра:  $51.87^\circ$  N,  $159.12^\circ$  E) по азимуту  $\varphi = 154^\circ$  на эпицентральном расстоянии  $R=138$  км (1 на графике), и закончившейся через 17 ч после него (длительность аномалии составила 47 ч). На графике интегральной активности (рисунок 5а) наблюдалось резкое увеличение частоты следования геоакустических импульсов (с превышением фонового уровня более чем в 4 раза), которому соответствовала активизация направлений в диапазоне  $40^\circ$ – $50^\circ$  (рисунок 5б).

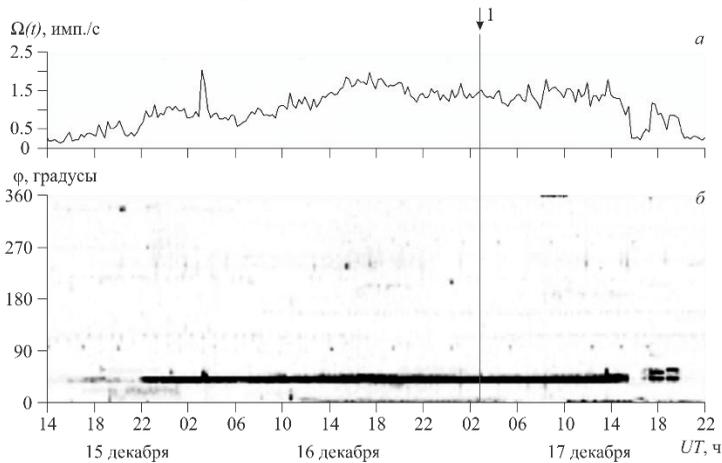


Рисунок 5 – Акустическая активность  $\Omega(t)$  (а) и ее азимутальное распределение  $D(\alpha, t)$  (б) в окрестности землетрясения с энергетическим классом  $K_s=10.3$  (1).  $\varphi$  – азимут. Стрелкой с продолжением в линию указан момент землетрясения

На рисунке 6 показаны аномалии направленности геоакустического излучения, связанные с землетрясением с энергетическим классом  $K_s=15.7$ , произошедшим 30.01.2016 г. в 03:25 UT (координаты эпицентра:  $53.85^\circ$  N,  $159.03^\circ$  E) по азимуту  $\varphi = 29^\circ$  на эпицентральном расстоянии  $R=110$  км (1 на графике), и его наиболее сильными афтершоками, зарегистрированными 30.01.2016 г. в 03:42 UT ( $53.75^\circ$  N,  $159.07^\circ$  E) с  $K_s=11.6$ ,  $R=100$  км,  $\varphi = 33^\circ$  (2 на графике) и в 06:53 UT ( $53.87^\circ$  N,  $159.21^\circ$  E) с  $K_s=10.5$ ,  $R=120$  км,  $\varphi = 33^\circ$  (3 на графике). Аномалия в диапазоне направлений от  $330^\circ$  до  $350^\circ$  (рисунок 6б), при которой наблюдалось превышение фонового уровня акустической активности в 6 раз (рисунок 6а), началась за 15 ч до землетрясения с  $K_s=15.7$  и закончилась примерно за 30 минут до него. Практически одновременно с ней по азимуту  $280^\circ$  зарегистрировано несколько меньшее повышение активности, которое продолжалось и после землетрясения и вероятнее всего связано с наличием афтершоков.

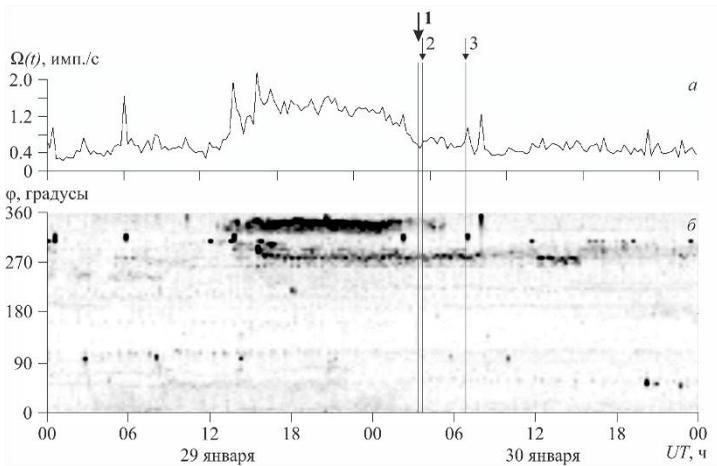


Рисунок 6 – Акустическая активность  $\Omega(t)$  (а) и ее азимутальное распределение  $D(a,t)$  (б) в окрестности землетрясения с  $K_s=15.7$  (1) и его афтершоков (2 и 3).  $\varphi$  – азимут. Стрелками с продолжением в линии указаны моменты землетрясений

Основной *вывод по главе 3* следующий. В направленности высокочастотной геоакустической эмиссии наблюдаются аномальные изменения, связанные с землетрясениями, которые выражаются в довольно резком увеличении частоты следования геоакустических импульсов по отдельным направлениям. Они наблюдаются как при подготовке землетрясений, так и при последующей релаксации остаточных напряжений в пункте наблюдений.

### Заключение

В диссертационной работе на основании выполненных исследований получены следующие основные результаты:

1. Показано, что при росте акустической активности в 5-суточном интервале перед землетрясениями с энергетическими классами  $9.0 < K_s \leq 10.0$ ,  $10.0 < K_s \leq 11.0$ ,  $11.0 < K_s \leq 12.0$  и  $K_s > 12.0$  и эпицентрными расстояниями  $R \leq 120$  км,  $R \leq 190$  км,  $R \leq 240$  км и  $R \leq 350$  км соответственно появляются ярко выраженные максимумы в азимутальном распределении геоакустического излучения, превышающие фоновые значения в несколько раз, которые продолжают и после землетрясений.

2. Исследована статистика появления пред- и постсейсмических аномальных изменений направленности высокочастотной геоакустической эмиссии. За период с 2008 по 2016 год такие изменения наблюдались в окрестностях более чем 70% землетрясений. Аномалии возникали за 10-30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжались в течение 6-20 ч после него. Длительность аномалий варьировалась в диапазоне от 10 до 50 ч, а повышенная активность регистрировалась в основном с направлений, соответствующих азимутам  $50^\circ$ ,  $155^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $320^\circ$ .

3. При исследовании фоновых характеристик высокочастотной геоакустической эмиссии, в частности ее периодических составляющих, установлено наличие суточной вариации с периодом равным 24 ч. Обнаружена статистическая связь между этой вариацией и суточной вариацией температуры воздуха. Наиболее вероятной причиной выявленной связи является влияние суточной разницы температур на приповерхностные

осадочные породы, в которых генерируется эмиссия. Влияния других метеорологических величин, а также землетрясений на суточную составляющую не выявлено.

4. Предложена методика автоматического выделения суточного хода геоакустической эмиссии, основанная на сравнении очищенных с помощью вейвлет-разложения сигналов геоакустической эмиссии с эталонными сигналами, которая реализована в виде компьютерной программы.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации, входящие в список ВАК по специальности 25.00.10:

1. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений / Ю.В. Марапудец, Б.М. Шевцов, И.А. Ларионов, М.А. Мищенко, А.О. Щербина, **А.А. Солодчук** // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 6. – С. 59-67.

2. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке / Г.И. Дружин, Ю.В. Марапудец, Н.В. Чернева, А.Ю. Исаев, **А.А. Солодчук** // ДАН. – 2017. – Т. 472, № 5. – С. 584-589.

### Свидетельства о регистрации электронного ресурса и баз данных

1. **Солодчук А.А.** Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 17545 от 07.11.2011 «Программный комплекс для исследования суточного хода геоакустической эмиссии».

2. **Солодчук А.А.** Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 19039 от 27.03.2013 «Программа «Поиск суточных вариаций» для автоматического определения наличия суточного хода геоакустической эмиссии».

3. **Солодчук А.А.**, Мищенко М.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620747 от 14.05.2015 «Геоакустические наблюдения на озере Микижа (полуостров Камчатка)».

4. **Солодчук А.А.**, Щербина А.О. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621676 от 19.12.2016 «Направленность источников геоакустического излучения на озере Микижа (полуостров Камчатка)».

### Публикации, проиндексированные в Web of Science и SCOPUS:

1. Марапудец, Ю.В. Суточный ход температуры как причина возникновения периодической вариации высокочастотной геоакустической эмиссии / Ю.В. Марапудец, **А.А. Солодчук** // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 4. – С. 37-44.

2. Marapulets, Yu.V. Changes of geoaoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka / Yu.V. Marapulets, **A.A. Solodchuk**, A.O. Shcherbina // E3S Web Conf. – 2016. – Vol. 11. – P. 00014

3. Joint perturbation of geoaoustic, emanation, and atmospheric electric fields at the boundary of the earth's crust and the atmosphere before an earthquake / O.P. Rulenko, Yu.V. Marapulets, Yu.D. Kuzmin, **A.A. Solodchuk** // E3S Web of Conf. – 2016. – Vol. 11. – P. 00020.

4. Anomalies of acoustic and electromagnetic fields in a seismically active region / Yu. V. Marapulets, G.I. Drugin, N.V. Cherneva, A.Yu. Isaev, **A.A. Solodchuk** // Proceedings

of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2016. – Vol. 10035. – P. 100355G.

**Публикации, входящие в список РИНЦ:**

1. **Солодчук, А.А.** Методика выявления суточного хода геоакустической эмиссии / А.А. Солодчук // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2012. – № 2 (5). – С. 69-73.
2. Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на активизацию пластических процессов в сейсмоактивном регионе / Ю.В. Марапулец, И.А. Ларионов, А.О. Щербина, **А.А. Солодчук**, Б.М. Шевцов // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. – 2014. – № 6. – 146311
3. Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора – атмосфера перед землетрясением / О.П. Руленко, Ю.В. Марапулец, Ю.Д. Кузьмин, **А.А. Солодчук** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2016. – № 3(14). – С. 72-78.
4. Марапулец, Ю.В. Изменение направленности геоакустического излучения на станции «Микижа» в связи с землетрясениями на Камчатке / Ю.В. Марапулец, **А.А. Солодчук**, А.О. Щербина // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2016. – № 4 (15). – С. 74-79.