

На правах рукописи



Мищенко Михаил Александрович

СВЯЗЬ МЕЖДУ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ
И ГЕОАКУСТИЧЕСКИМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ НА КАМЧАТКЕ

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

с. Паратунка, Елизовский р-н, Камчатский край – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Марапулец Юрий Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией акустических исследований

Научный консультант: **Руленко Олег Петрович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии

Официальные оппоненты: **МОРОЗОВ Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова», заведующий отделом физики облаков и атмосферного электричества

ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, старший научный сотрудник лаборатории ионосферных исследований

Ведущая организация: Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «___» _____ 2016 г. в ____ часов на заседании совета Д 212.232.35 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, Средний пр., В.О., дом 41/43, ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» и на сайте по адресу <http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/741.html>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.232.35
кандидат физ.-мат. наук,

Кубышкина Марина Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В работе рассматривается актуальная проблема взаимодействия геофизических полей при воздействии литосферы на атмосферу, которое определяется динамикой литосферных процессов и интенсивно происходит на границе этих геосфер. Наиболее сильно литосферно-атмосферное воздействие проявляется в сейсмоактивных регионах на заключительной стадии подготовки землетрясений, когда усиливается деформирование пород [1–4, 16]. Исследования автора посвящены влиянию процесса деформирования приповерхностных осадочных пород на поведение атмосферного электрического поля у поверхности земли. В качестве индикатора активизации деформирования пород рассматривается возникающее при этом излучение упругих волн – геоакустическая эмиссия.

Глобальная атмосферно-электрическая токовая цепь подвержена внешним воздействиям, среди которых присутствуют галактические космические лучи, солнечный ветер и др. В региональном масштабе эти воздействия обусловлены метеорологическими факторами, антропогенными источниками, а также процессами в литосфере. Область исследования данной работы ограничена изучением влияния приповерхностных литосферных источников в сейсмоактивном регионе на атмосферное электрическое поле у поверхности земли.

В сейсмоактивных регионах при спокойной погоде регистрируются аномальные возмущения атмосферного электрического поля (АЭП) у поверхности земли, которые возникают в зоне подготовки землетрясений и связаны с деформированием приповерхностных пород [14]. Они наблюдаются в интервале до полутора суток перед землетрясениями и удалении – первые сотни километров от эпицентра. Результаты геоакустических исследований на Камчатке [10, 11] показали, что при усилении деформирования приповерхностных осадочных пород в результате относительных микросмещений их фрагментов возникают предсейсмические аномальные возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии (ГАЭ). Они наблюдаются на частотах единицы килогерц и имеют аналогичное с аномалиями АЭП время упреждения. Общая деформационная природа тех и других возмущений вместе с одинаковыми особенностями их проявления служат основанием для исследования связи между аномальными возмущениями АЭП и ГАЭ.

Решение задач по изучению связи между разными по своей природе рассматриваемыми полями обеспечивается уникальным аппаратно-измерительным комплексом, созданным для проведения совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений. Полученные данные позволили рассмотреть влияние процессов, протекающих в приповерхностных осадочных породах на заключительной стадии подготовки землетрясений, на поведение АЭП. Результаты исследований актуальны для понимания физики воздействия литосферы на атмосферу во время активизации сейсмотектонического процесса и появления предвестников землетрясений в литосфере и атмосфере.

Предмет исследования – связь между аномальными возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород.

Целью работы является исследование связи между аномальными возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен аналитический обзор современного состояния исследований в области атмосферного электричества и акустической эмиссии.
2. Разработан метод одновременных измерений, который реализован в созданном аппаратно-измерительном комплексе, и проведены совместные атмосферно-электрические и геоакустические наблюдения в сейсмоактивном регионе.

3. Исследованы аномальные возмущения атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии в условиях спокойной погоды.
4. Исследованы особенности связи между аномальными возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии.
5. Проанализирована статистика появления предсейсмических аномальных возмущений атмосферного электрического поля в летне-осенние периоды 2006–2012 гг. и геоакустической эмиссии в 2003–2012 гг.

Научная новизна работы

Выполнены одновременные наблюдения атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии, генерируемой приповерхностными осадочными породами. Для проведения таких наблюдений разработан и реализован уникальный аппаратно-измерительный комплекс. Впервые в сейсмоактивном регионе обнаружены одновременные возмущения атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии. Впервые исследована связь между возмущениями атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии, при использовании непараметрического корреляционного анализа обнаружена ее высокая статистическая значимость. Проведен анализ статистики появления предсейсмических аномальных возмущений атмосферного электрического поля в летне-осенние периоды 2006–2012 гг. и геоакустической эмиссии в 2003–2012 гг.

Практическая ценность работы

Работа выполнена в соответствии с Программами фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», научными темами и планами работ ИКИР ДВО РАН, проектами ДВО РАН № 05-1-02-051, № 06-1-П16-070, № 09-III-A-02-043, № 12-III-A-07-107.

Полученные результаты исследований динамики атмосферного электрического поля у поверхности земли представляют интерес для понимания процессов, протекающих при воздействии литосферы на атмосферу в сейсмоактивном регионе, и вместе с анализом динамики других полет могут быть использованы при разработке систем оповещения о сейсмической опасности.

Оригинальность разработанных автором программных продуктов подтверждена свидетельствами о регистрации разработок № 10029 от 21.02.2008 и № 19789 от 24.12.2013, свидетельством о регистрации базы данных № 2015620747 от 14.05.2015 и патентом на изобретение № 256338 от 21.08.2015.

Личный вклад

Автор работы принимал непосредственное участие в разработке программного обеспечения, установке, калибровке и эксплуатации аппаратно-измерительного комплекса, созданного для совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений. Участвовал в обобщении и анализе полученных результатов и обосновании наблюдаемых эффектов. Вместе с соавторами принимал участие в подготовке материалов для 21 научного мероприятия, на девяти из которых выступал лично, и участвовал в подготовке 41 научной публикации. Принимал участие в рассмотрении связи между атмосферным электрическим полем и геоакустической эмиссией. Проанализировал возмущения атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии, исследовал их амплитудно-временные характеристики и предложил критерии выделения аномальных возмущений. Сопоставил атмосферно-электрические и геоакустические возмущения с поведением метеорологических величин. Провел анализ статистики появления возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии перед землетрясениями. Разработал подсистему частотно-временной обработки цифровых данных, которая надежно работает в режиме реального времени в составе подсистемы регистрации геоакустической эмиссии. Разработал пакет программ для совместной визуализации, обработки и анализа результатов измерений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружены одновременные возмущения атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии, которые могут проявляться в сейсмически спокойные периоды и на заключительной стадии подготовки землетрясений.
2. Выявлена статистически высокозначимая корреляционная связь между аномальными возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии.
3. Проведен анализ появления предсейсмических возмущений атмосферного электрического поля в летне-осенние периоды 2006–2012 гг. и высокочастотной геоакустической эмиссии в 2003–2012 гг.
4. Разработан и реализован аппаратно-измерительный комплекс для проведения совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений в сейсмоактивном регионе.

Достоверность результатов обеспечивается систематической калибровкой использованной аппаратуры, стандартными методиками обработки данных и соблюдением метрологических требований к измерительной аппаратуре.

Апробация работы

Результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах в Санкт-Петербургском государственном университете, Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, а также следующих научных мероприятиях: Региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле» (г. П-Камчатский, 2005); Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ (г. П-Камчатский, 2006, 2009); Международных конференциях по мягким вычислениям и измерениям "SCM'2007", "SCM'2008", "SCM'2009" (г. С.-Петербург, 2007, 2008, 2009); XXIV General Assembly Of The International Union of Geodesy and Geophysics "IUGG'2007" (Perugia, Italia, 2007); IV, V и VI международных конференциях «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, 2007, 2010, 2013); III и IV всероссийских научных конференциях «Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab» (г. С.-Петербург, 2007, 2009); I и II научно-технической конференциях «Проблемы геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (г. П.-Камчатский, 2007, 2009); IV международном симпозиуме "Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы" (г. Бишкек, Киргизстан, 2008); V международном симпозиуме «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (г. Бишкек, Республика Киргизия, 2011); XXIV сессии Российского акустического общества, Сессии научного совета по акустике РАН (г. Саратов, 2011); Научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе» (г. Южно-Сахалинск, 2011); XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (г. Новосибирск, 2013); 9th and 10th International Conferences «Problems of Geocosmos» (St. Petersburg, Petrodvorets, 2012, 2014).

Публикации

По теме диссертации в соавторстве опубликована 41 научная работа, из них 9 в рецензируемых журналах (7 из которых входят в перечень ВАК, а 2 в перечень РИНЦ), 1 монография, 27 публикаций в материалах научных мероприятий. Получены 2 свидетельства об отраслевой регистрации разработок, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 100 наименований, и приложения. Работа содержит 110 листов машинописного текста, 45 рисунков, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Обоснование проведения совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений» представлен обзор современного состояния вопроса исследований в области атмосферного электричества и геоакустической эмиссии. Раскрыта целесообразность постановки совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений.

В разделе 1.1 «Электрическое поле в атмосфере» рассмотрена теория атмосферного электрического поля Земли. Приведены некоторые наиболее известные модели атмосферного электричества (Вильсона и Робла-Хейса). Описана глобальная электрическая цепь, условия ее существования и основные генераторы, а также глобальные и региональные факторы воздействия. Рассмотрены особенности электрического поля в приземном слое атмосферы и возможный механизм появления его аномальных возмущений.

При хорошей погоде в атмосфере находятся положительные объемные заряды, а на поверхности земли присутствует отрицательный заряд, что соответствует отрицательной напряженности электрического поля E и положительному градиенту его потенциала V' [18]. Связь этих величин определяется соотношением: $V' = -E$. Показано, что вблизи земной поверхности под действием электродного эффекта изменяется распределение концентрации ионов, формируется положительный объемный заряд и происходит искажение напряженности (градиента потенциала) электрического поля. Результаты численного моделирования параметров приземного слоя атмосферы [8, 19] показывают, что в условиях нетурбулентного электродного эффекта на высоте около 0,6–4 м возможно появление отрицательного объемного заряда вследствие увеличения интенсивности ионообразования, что приводит к уменьшению значений регистрируемого поля. Согласно [20], основным источником повышения интенсивности ионизации воздуха на этой высоте может являться α -излучение радиоактивных газов. В условиях активно протекающего в Камчатском регионе сейсмотектонического процесса в результате активизации деформирования приповерхностных осадочных пород может происходить более интенсивное раскрытие пор и трещин. Это способствует усилению выделения радиоактивных газов, увеличению их концентрации в приповерхностном слое грунта и значительному поступлению в атмосферу [17].

Таким образом, одним из возможных источников аномальных возмущений электрического поля, регистрируемых в сейсмоактивных регионах при спокойной погоде, является образование у земли слоя воздуха с повышенной ионизацией вследствие увеличения интенсивности выделения из почвы радиоактивных газов при активизации деформационных процессов. В результате возникает отрицательный вертикальный градиент электропроводности и, как следствие, отрицательный объемный заряд [18]. Он частично или полностью компенсирует положительный объемный заряд электродного эффекта, что вызывает уменьшение и даже изменение знака регистрируемого поля (реверс электродного эффекта). Выравнивание концентрации ионов по высоте приводит к исчезновению градиента электропроводности воздуха и аномалии электрического поля.

В настоящей работе в качестве характеристики электрического поля у поверхности земли рассматривался градиент потенциала V' поля. Для измерения V' в натуральных экспериментах использовался ротационный электростатический флюксметр «Поле-2М», на основе которого создана подсистема регистрации электрического поля.

В разделе 1.2 «Акустическая эмиссия приповерхностных пород» рассмотрены теоретические основы явления акустической эмиссии как генерации упругих волн в твердом теле. Изложены общие принципы распространения упругих колебаний в горных породах. Приведены соотношения для продольных и поперечных волн.

Рассмотрено применение акустической эмиссии в различных областях науки и техники. Акустическую эмиссию рассматривают в различных частотных диапазонах: сейсмическом

(доли – единицы герц), высокочастотном сейсмическом (десятки герц), звуковым (десятки герц – первые килогерцы) и ультразвуковым (десятки кГц и выше). В геофизике звуковой диапазон частот акустической эмиссии используется для геоакустических исследований в штольнях и скважинах с разной глубиной для контроля начальной стадии развития разрушений в горных породах, за которой последуют горные удары или катастрофические землетрясения.

Результаты исследования геоакустической эмиссии в широком диапазоне частот (0.1–10000 Гц) на Камчатке показали, что многим сейсмическим событиям предшествовали некоторые изменения в характере регистрируемой ГАЭ [9–11]. Выявленные геоакустические эффекты выражались в повышении интенсивности сигналов эмиссии в диапазоне частот от единиц до первых десятков килогерц. Было показано, что повышение интенсивности высокочастотной ГАЭ обусловлено ростом локальных напряжений в приповерхностных осадочных породах [7]. Для регистрации сигналов геоакустической эмиссии использовались пьезокерамические преобразователи давления (гидрофоны), установленные в искусственном водоеме в пункте наблюдений «Карымшина» и в озере Микижа. Рассматривалось акустическое давление P_s в килогерцовом диапазоне частот, накопленное на 4-х секундном интервале. На основе комплекса совмещенных гидрофонов создана подсистема регистрации ГАЭ.

Раздел 1.3 «Совместные атмосферно-электрические и геоакустические наблюдения и их аппаратно-программная реализация» посвящен организации совместных наблюдений. Раскрыта необходимость их проведения, рассмотрены основные подсистемы и части аппаратно-измерительного комплекса.

Для исследования связи между разными по своей природе геофизическими полями, которыми являются атмосферное электрическое поле и геоакустическая эмиссия, разработан и реализован аппаратно-измерительный комплекс, блок-схема которого приведена на рис. 1. Комплекс состоит из двух пространственно разнесенных аппаратно-программных частей: автономной части в пункте наблюдений, где отсутствуют техногенные помехи для АЭП и ГАЭ, и стационарной части, находящейся в здании Института космофизических исследований и распространения радиоволн (Институт). Для связи между частями комплекса организована сеть Radio Ethernet на основе радиомодемов. В первой части комплекса осуществляются измерение АЭП и ГАЭ, оцифровка, запись и передача данных на стационарную часть, а во второй – их прием, предварительная обработка и последующее хранение для углубленного анализа, а также оперативный контроль работы первой части комплекса.

Стационарная часть аппаратно-измерительного комплекса для совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений была установлена в с. Паратунка в здании

Института. Автономная часть комплекса в разное время находилась в пунктах наблюдений «Микижа» (2005–2008 гг.) и «Карымшина» (2009–2012 гг.).

В качестве датчика акустического давления использовался пьезокерамический гидрофон, установленный в озере Микижа и в искусственном водоеме в пункте «Карымшина». Рассматривалось акустическое давление P_s в диапазоне частот 2.0–6.5 кГц. Градиент потенциала V' атмосферного электрического поля измерялся на высоте 7 см от поверхности земли при

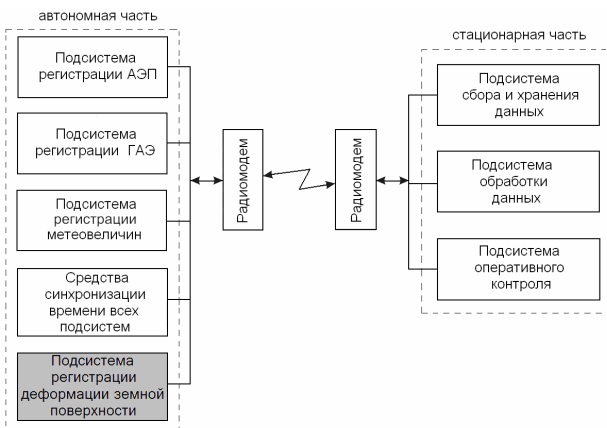


Рис. 1. Блок-схема аппаратно-измерительного комплекса.

помощи флюксметра "Поле-2М", который был установлен на открытой поляне на расстоянии порядка 100 м от гидрофона.

В отличие от наблюдений на озере Микижа, автономная часть аппаратно-измерительного комплекса в пункте «Карымшина» была дополнена подсистемой регистрации деформации земной поверхности. Лазерный деформограф–интерферометр был установлен на поверхности земли в 42 м от флюксметра и 30 м от гидрофона. Рассматривалась относительная деформация пород ε и ее скорость $\dot{\varepsilon}$ [12].

В заключение первой главы сделан вывод о целесообразности проведения комплексных исследований атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии для изучения природы взаимодействия геофизических полей на границе соприкосновения атмосферы и литосферы. Для решения задач по исследованию связи между разными по своей природе полями создан уникальный аппаратно-измерительный комплекс для совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений.

Во **второй главе** «Исследование связи между атмосферно-электрическими и геоакустическими возмущениями» представлены результаты исследования особенностей проявления одновременных возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии и проведен корреляционный анализ связи между ними. Приведены результаты одновременных атмосферно-электрических и геоакустических измерений в комплексе с измерениями деформации земной поверхности.

В **разделе 2.1** «Исследование особенностей проявления одновременных возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии» представлены результаты натурных экспериментов в пункте «Микижа» в 2005–2007 гг., в ходе которых зарегистрированы одновременные аномальные возмущения атмосферного электрического поля и высокочастотной геоакустической эмиссии, возникающие как в сейсмически спокойные периоды, так и на заключительной стадии подготовки землетрясений. В экспериментах обнаружена связь между атмосферным электрическим полем и высокочастотной геоакустической эмиссией, характерной особенностью проявления которой является уменьшение градиента потенциала поля вплоть до изменения знака и последующее восстановление через некоторое время примерно до прежнего уровня. Это наблюдается при значительных, как правило, с резким началом и длительностью больше нескольких минут возмущениях акустического давления, которые происходят иногда в условиях спокойной погоды (отсутствуют дождь, сильный и умеренный ветер, слабо меняется атмосферное давление).

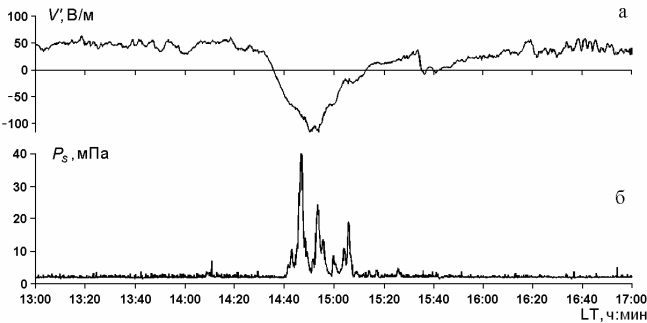


Рис. 2. Пример одновременных возмущений градиента потенциала V' электрического поля (а) и акустического давления P_s в килогерцовом диапазоне частот (б) в эксперименте 22 августа 2006 г.

На рис. 2 представлен пример одновременных возмущений градиента потенциала V' электрического поля и акустического давления P_s , зарегистрированных в пункте наблюдений «Микижа» 22 августа 2006 г.

Раздел 2.2 «Исследование корреляционной связи между атмосферно-электрическими и геоакустическими возмущениями» посвящен корреляционному анализу временных рядов исследуемых полей.

При помощи непараметрических методов корреляционного анализа исследована связь между атмосферным электрическим полем у поверхности земли и геоакустической эмиссией в экспериментах 2006 и 2007 гг. Рассматривались среднечасовые значения градиента потенциала \bar{V}' , акустического

давления \bar{P}_S и метеовеличин. Для выбора подходящего метода анализа данных распределения всех рядов проверялись на нормальность. Использовались оценки коэффициентов асимметрии, эксцесса и их стандартных ошибок, а также критерий Шапиро-Уилка. Результаты проверки показали, что распределение всех исследуемых рядов отлично от нормального, поэтому для дальнейшего анализа использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который менее чувствителен к выбросам и является устойчивой и надежной мерой оценки связи. В табл. 1 представлены результаты оценки коэффициента корреляции Спирмена для исследования связи \bar{V}' и \bar{P}_S с метеорологическими величинами.

Таблица 1. Оценки коэффициента корреляции Спирмена r_s и его уровня значимости p между рядами среднечасовых значений электрического поля \bar{V}' , акустического давления \bar{P}_S и метеовеличин: атмосферного давления \bar{P}_a , температуры \bar{T} и влажности \bar{F} воздуха, скорости ветра \bar{U} , интенсивности осадков \bar{I} ; n – число пар среднечасовых значений коррелируемых рядов.

Ряд	\bar{P}_a			\bar{T}			\bar{F}			\bar{U}			\bar{I}		
	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p
Эксперимент 2006															
\bar{V}'	2273	0.12	<0.001	2273	0.10	<0.001	2273	-0.07	0.001	2273	-0.08	<0.001	2273	-0.27	<0.001
\bar{P}_S	2464	-0.04	0.029	2464	0.06	0.005	2464	-0.16	<0.001	2464	0.19	<0.001	2464	0.34	<0.001
Эксперимент 2007															
\bar{V}'	2569	0.15	<0.001	2569	-0.15	<0.001	2569	-0.08	<0.001	2569	-0.11	<0.001	2569	-0.28	<0.001
\bar{P}_S	2643	-0.15	<0.001	2643	0.13	<0.001	2643	-0.04	0.035	2643	0.22	<0.001	2643	0.31	<0.001

Согласно результатам в табл. 1 на электрическое поле и акустическое давление наибольшее влияние оказывают ветер и дождь. Поэтому далее рассматривалась связь только между теми парами \bar{V}' и \bar{P}_S , когда отсутствовал дождь, скорость ветра была меньше 1.5 м/с, а атмосферное давление – больше 995 гПа. На рис. 3 приведены диаграммы рассеяния между \bar{V}' и \bar{P}_S при такой спокойной погоде.

Представленная на рис. 3 связь содержит две компоненты: фоновую, обусловленную слабым действием на электрическое поле и геоакустическую эмиссию неучтенных метеорологических, а также других факторов и компоненту тектонической природы. Последняя формируется разными по знаку возмущениями электрического поля и геоакустической эмиссии, возникающими во время активизации деформирования приповерхностных пород в районе пункта измерений. Такая активизация должна происходить неоднократно при интенсивно протекающем у Восточной Камчатки сеймотектоническом процессе. Предложено, что фоновая компонента связи проявляется при $\bar{P}_S < \bar{P}_S^*$, а тектоническая – когда $\bar{P}_S > \bar{P}_S^*$, что происходит при активизации деформирования пород.

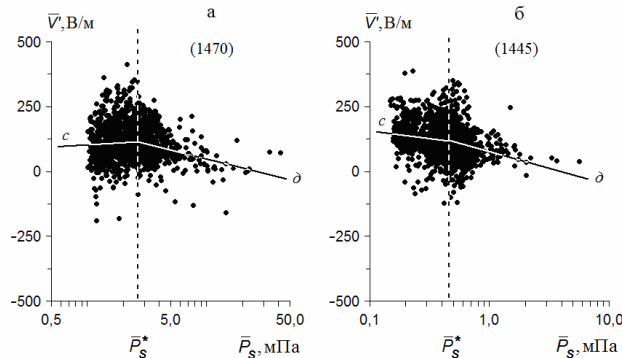


Рис. 3. Диаграммы рассеяния между среднечасовыми значениями \bar{V}' и \bar{P}_S . В скобках указано число пар среднечасовых значений. Вертикальные пунктирные линии – значения акустического давления \bar{P}_S^* , которые соответствуют точкам разрыва кусочно - линейной регрессии по акустическому давлению; c , d – прямые, иллюстрирующие регрессию для фоновой и тектонической компонент связи.

Предложено, что фоновая компонента связи проявляется при $\bar{P}_S < \bar{P}_S^*$, а тектоническая – когда $\bar{P}_S > \bar{P}_S^*$, что происходит при активизации деформирования пород.

Для разделения компонент связи применялась кусочно-линейная регрессия. Использовался квазиньютоновский метод оценивания параметров регрессии. Точка разрыва по акустическому давлению соответствует в первом приближении значению $\overline{P_S^*}$.

Для массивов данных, представленных на рис. 3, коэффициент корреляции Спирмена в экспериментах 2006 и 2007 гг. равен -0.08 и -0.32 соответственно. Для этих же массивов в случае кусочно-линейной регрессии $\overline{V'}$ на $\overline{P_S}$ коэффициент множественной корреляции значительно больше и равен соответственно 0.77 и 0.77 . Таким образом, кусочно-линейная регрессия лучше характеризует связь между $\overline{V'}$ и $\overline{P_S}$, поэтому разделение массивов на две компоненты корректно. Параметры фоновой и тектонической компонент связи даны в табл. 2.

Оценки значения коэффициента корреляции Спирмена r_S для фоновой и тектонической компонент связи между электрическим полем и геоакустической эмиссией показали, что в экспериментах 2006 и 2007 гг. присутствует статистически высокозначимая корреляционная связь между $\overline{V'}$ и $\overline{P_S}$ в тектонической компоненте ($r_S = -0.27$ и $r_S = -0.23$ соответственно, $p < 0.001$), которая, на первый взгляд, не является сильной.

Однако значения коэффициента корреляции r_S в ней (табл. 2) близки к его значениям между электрическим полем и интенсивностью дождя (табл. 1), влияние которого на электрическое поле считается наиболее сильным в атмосферном электричестве [5, 18].

В разделе 2.3 «Деформационная природа одновременных аномальных возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии» приведены результаты

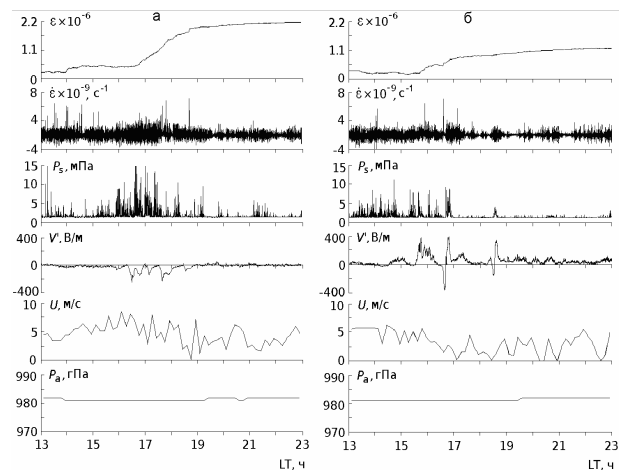


Рис. 4. Поведение относительной деформации приповерхностных пород ε , ее скорости $\dot{\varepsilon}$, акустического давления P_s в диапазоне частот $0.7\text{--}2.0$ кГц, градиента потенциала V' электрического поля, скорости ветра U , атмосферного давления P_a 14 (а) и 16 (б) октября 2009 г. Увеличение ε соответствует растяжению.

Таблица 2. Параметры фоновой ($\overline{P_S} < \overline{P_S^*}$) и тектонической ($\overline{P_S} > \overline{P_S^*}$) компоненты связи между среднечасовыми значениями электрического поля $\overline{V'}$ и акустического давления $\overline{P_S}$. n – число пар $\overline{V'}$ и $\overline{P_S}$, r_S – коэффициент корреляции Спирмена, p – его уровень значимости.

Параметр	Эксперимент 2006, компонента связи		Эксперимент 2007, компонента связи	
	фоновая	тектоническая	фоновая	тектоническая
n	969	501	792	653
r_S	0.11	-0.27	-0.15	-0.23
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

одновременных атмосферно-электрических и геоакустических измерений в комплексе с измерениями деформации земной поверхности, которые проводились в пункте наблюдений «Карымшина» в период 1–18 октября 2009 г. При слабо меняющемся атмосферном давлении, отсутствии дождя, сильного ветра зарегистрированы одновременные возмущения геоакустической эмиссии и электрического поля (рис. 4). Они происходили во время многочисленных знакопеременных подвижек приповерхностных пород, возникавших на фоне их сравнительно медленного растяжения. Наличие таких подвижек, которые регистрировались в пункте «Карым-

шина» и раньше [7], хорошо видно на графике скорости деформации $\dot{\epsilon}$ на рис. 4.

Наблюдается связь между возмущениями градиента потенциала V' , акустического давления P_s и поведением $\dot{\epsilon}$, которая особенно заметна в 18–19 ч 16 октября (рис. 4б). Она свидетельствует, что появление этих возмущений связано с динамикой деформирования приповерхностных пород. Возмущения V' регистрировались в виде уменьшения вплоть до изменения знака с последующим восстановлением примерно до прежнего уровня (рис. 4а), а также – с положительным увеличением после восстановления (рис. 4б).

Таким образом, аномальные возмущения геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля у поверхности земли возникают как одновременный отклик на деформацию приповерхностных осадочных пород.

В качестве основных выводов второй главы следует отметить, что в результате натуральных экспериментов обнаружена связь между возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и акустической эмиссии приповерхностных пород в килогерцовом диапазоне частот. Результаты исследования связи при помощи непараметрических методов корреляционного анализа свидетельствуют о ее высокой статистической значимости. В результате натуральных экспериментов показано, что появление одновременных возмущений эмиссии и поля обусловлено динамикой деформирования приповерхностных осадочных пород.

Третья глава «Результаты исследования предсейсмических возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии» посвящена исследованию аномальных возмущений эмиссии и поля перед землетрясениями. Для анализа предсейсмических возмущений использованы длительный непрерывный ряд измерений геоакустической эмиссии в период 2003–2012 гг. с пункта «Микижа» и данные измерений атмосферного электрического поля, которые получены в летне-осенние периоды 2006–2008 гг. в пункте «Микижа» и 2009–2012 гг. в пункте «Карымшина». Аномальные возмущения эмиссии и поля сопоставлялись с каталогом землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН, далее по тексту региональный сейсмический каталог (<http://www.emsd.ru/ts/>).

В разделе 3.1 «Критерии выделения аномальных возмущений геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля» проанализированы аномальные возмущения эмиссии и поля в условиях спокойной погоды, исследованы амплитудно-временные характеристики возмущений и предложены критерии их выделения.

Анализ данных геоакустических наблюдений в сейсмоактивных регионах показал, что перед сильными землетрясениями иногда регистрируются аномальные возмущения геоакустической эмиссии, которые проявляются в виде резкого повышения интенсивности акустических шумов в килогерцовом диапазоне частот [9, 10]. Пример такого возмущения геоакустической эмиссии представлен на рис. 2б. За период 2003–2007 гг. было выявлено 266 таких возмущений ГАЭ. На основе их анализа предложены следующие критерии выделения возмущений: амплитуда P_s , усредненная в интервале 5 мин, должна превышать значение фонового уровня ГАЭ более чем в 4 раза с длительностью не менее 15 мин. В качестве фонового уровня ГАЭ принималось среднее значение амплитуды P_s за наиболее спокойный суточный период в ближайшие десять дней до возмущения.

Анализ данных атмосферно-электрических наблюдений в сейсмоактивных регионах показал, что перед сильными землетрясениями иногда регистрируются аномальные возмущения электрического поля. В качестве таких возмущений обычно рассматриваются бухтообразные уменьшения градиента потенциала V' поля вплоть до изменения знака и его последующие восстановления через некоторое время примерно до прежнего уровня [14]. Пример такого возмущения АЭП представлен на рис. 2а.

С учетом того, что атмосферно-электрические измерения проводились нами в летне-осенние периоды и продолжались только около трех месяцев в году, данных по предсейсмическим возмущениям АЭП получено недостаточно для определения критериев их выделения. Поэтому критерии подбирались на основе анализа предсейсмических характеристик АЭП на Камчатке, выполненного в работе [15] за непрерывный период 1997–2002 гг. Минимальная

длительность возмущений АЭП составляет 15–20 мин, а минимальная амплитуда бухтообразных понижений градиента потенциала V' составляет -100 В/м [15].

Атмосферно-электрические и геоакустические возмущения, рассмотренные в главе 2, возникают почти одновременно и соизмеримы по продолжительности. Поэтому при дальнейшем анализе, так же как и для возмущений ГАЭ, выделялись предсейсмические возмущения АЭП длительностью более 15 мин и минимальным значением понижения градиента потенциала V' поля, равным -100 В/м, что соответствует результатам, полученным в [15].

В разделе 3.2 «Оценка связи аномальных возмущений геоакустической эмиссии с землетрясениями Южной Камчатки» показано, что появление аномальных возмущений ГАЭ перед землетрясениями является неслучайным событием.

Сопоставление аномальных возмущений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии, зарегистрированных в условиях спокойной погоды, с землетрясениями из регионального сейсмического каталога показало, что достаточно много возмущений в интервале нескольких суток предшествует сейсмическим событиям. Логично предположить, что предсейсмические возмущения в электрическом поле и акустической эмиссии связаны с землетрясениями, произошедшими у Южной Камчатки. Оценить неслучайность этого эффекта в атмосферном электрическом поле очень сложно из-за сравнительно коротких рядов наблюдений. Поэтому для решения такой задачи был использован непрерывный и достаточно длительный ряд наблюдений геоакустической эмиссии. Проведено численное моделирование на основе сейсмических и геоакустических данных с пункта наблюдений «Микижа» за период 2003–2007 гг. Используются методы Монте-Карло и наложения эпох [13]. Результаты представлены на рис. 5 и рис. 6.

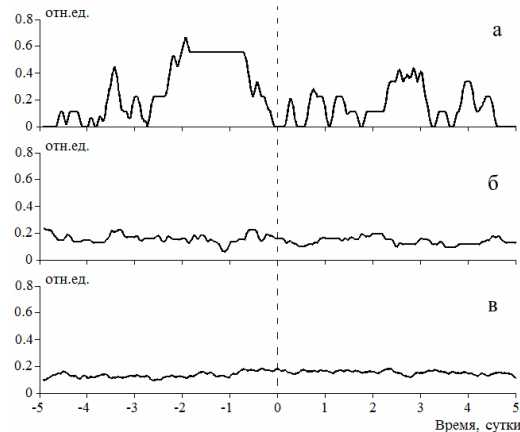


Рис. 6. Результаты наложения эпох для землетрясений с $K_s > 12.0$. (а) – наложение для 18 «реальных» землетрясений, (б) и (в) – для 18 «виртуальных» (усреднение проведено по 25 и 100 сериям соответственно). Пунктирной линией отмечен момент землетрясения.

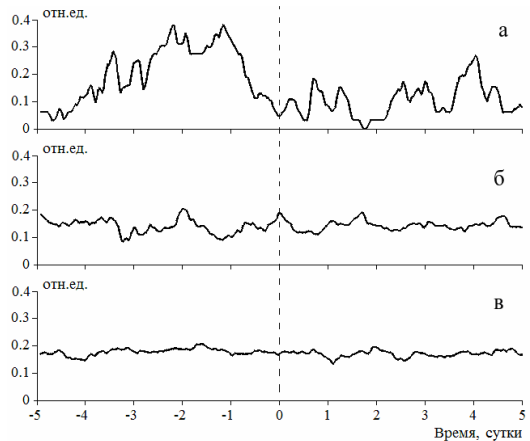


Рис. 5. Результаты наложения эпох для землетрясений с $K_s > 11.0$. (а) – наложение для 43 «реальных» землетрясений, (б) и (в) – для 43 «виртуальных» (усреднение проведено по 25 и 100 сериям соответственно). Пунктирной линией отмечен момент землетрясения.

Суть применения методов заключается в следующем. На основе регионального сейсмического каталога были отобраны две группы землетрясений с энергетическими классами $K_s > 11.0$ и $K_s > 12.0$ на эпицентральных расстояниях $D \leq 240$ и $D \leq 350$ км соответственно. Такие расстояния выбраны в соответствии с данными анализа возмущений ГАЭ [10] и скорректированы с учетом модельных исследований [6]. Все землетрясения из первой группы (всего 43) были нанесены на временной ряд возмущений ГАЭ. Около каждого землетрясения была выделена

временная окрестность ± 5 дней. После этого проведено поэлементное наложение и усреднение выделенных временных окрестностей, т.е. использовался метод наложения эпох. Результаты такого наложения для 43 землетрясений с $K_s > 11.0$ представлены на рис. 5а.

На основе «реальных» землетрясений путем случайной генерации времени их возникновения были получены ряды «виртуальных» землетрясений, для которых также было проведено наложение эпох, но с накоплением по 25 и 100 серий. Результаты наложения для 43 «виртуальных» землетрясений приведены на рисунках 5б и 5в (для 25 и 100 серий соответственно). Анализ графиков показывает, что на рис. 5а за несколько дней до сейсмического события имеется повышение амплитуды исследуемой величины, а на рис. 5б и рис. 5в такого повышения нет.

Аналогичные результаты получены для группы землетрясений с $K_s > 12.0$ (всего 18 землетрясений). На основе «реальных» землетрясений сгенерировано 25 и 100 серий, содержащих по 18 «виртуальных» землетрясений. Результаты наложения эпох приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 5 и 6, возмущения ГАЭ наблюдаются перед «реальными» землетрясениями из настоящего регионального сейсмического каталога. Это справедливо для групп землетрясений с $K_s > 11.0$ и $K_s > 12.0$. Однако наиболее сильное повышение амплитуды ГАЭ получено для землетрясений с $K_s > 12.0$. Согласно рис. 6а, время появления возмущений ГАЭ составляет примерно от 2.5 суток до 5 часов перед землетрясением. При генерации искусственных сейсмических каталогов («виртуальных» землетрясений) данный геоакустический эффект отсутствует. Таким образом, можно сделать вывод, что эффект появления аномальных возмущений геоакустической эмиссии, наблюдаемый перед землетрясениями, является неслучайным событием.

В разделе 3.3 «Анализ появления предсейсмических возмущений геоакустической эмиссии» с учетом критериев, сформулированных в п. 3.1, проанализирован ряд геоакустических данных с пункта наблюдений «Микижа», зарегистрированных в период 2003–2012 гг. Выявлены аномальные возмущения геоакустической эмиссии, зарегистрированные в условиях спокойной погоды (слабоменяющееся давление, отсутствие осадков и скорость ветра меньше 6 м/с). Из регионального сейсмического каталога выбраны две группы землетрясений с энергетическими классами $11.0 < K_s \leq 12.0$, $K_s > 12.0$ и эпицентрными расстояниями до пункта наблюдений $D \leq 240$, $D \leq 350$ км соответственно. По результатам моделирования, рассмотренного в п. 3.2, для поиска возмущений ГАЭ выбран временной интервал от 2.5 суток до 5 часов перед землетрясениями. Проведено сопоставление выбранных землетрясений с аномальными возмущениями ГАЭ. Рассмотрено наличие возмущений ГАЭ перед 107 землетрясениями. Полученные результаты приведены в табл. 3. На рис. 7 на карте Камчатки представлены эпицентры землетрясений, использованных при сопоставлении.

Согласно табл. 3 возмущения ГАЭ наблюдались перед 42 из 69 землетрясений с характеристиками $11.0 < K_s \leq 12.0$ и $D \leq 240$ км и перед 28 из 38 с $K_s > 12.0$ и $D \leq 350$ км.

Результаты сопоставления возмущений геоакустической эмиссии и землетрясений с энергетическим классом $K_s > 9.0$ показали, что 36.8% возмущений ГАЭ предшествуют землетрясениям. Таким образом, процент ложных тревог составляет 63.2%.

Таблица 3. Результаты сопоставления землетрясений с аномальными возмущениями геоакустической эмиссии.

Землетрясения						
класс	$11.0 < K_s \leq 12.0$			$K_s > 12.0$		
год	всего	предваряются возмущениями АЭП	%	всего	предваряются возмущениями АЭП	%
2003	7	5	71,4	3	3	100
2004	4	2	50	6	6	100
2005	1	0	0	2	2	100
2006	7	5	71,4	4	3	75
2007	6	5	83,3	3	3	100
2008	5	4	80	6	3	50
2009	8	6	75	1	0	0
2010	5	1	20	7	3	42,9
2011	17	9	52,9	3	3	100
2012	9	5	55,6	3	2	66,7
Итого	69	42	60,9	38	28	73,7

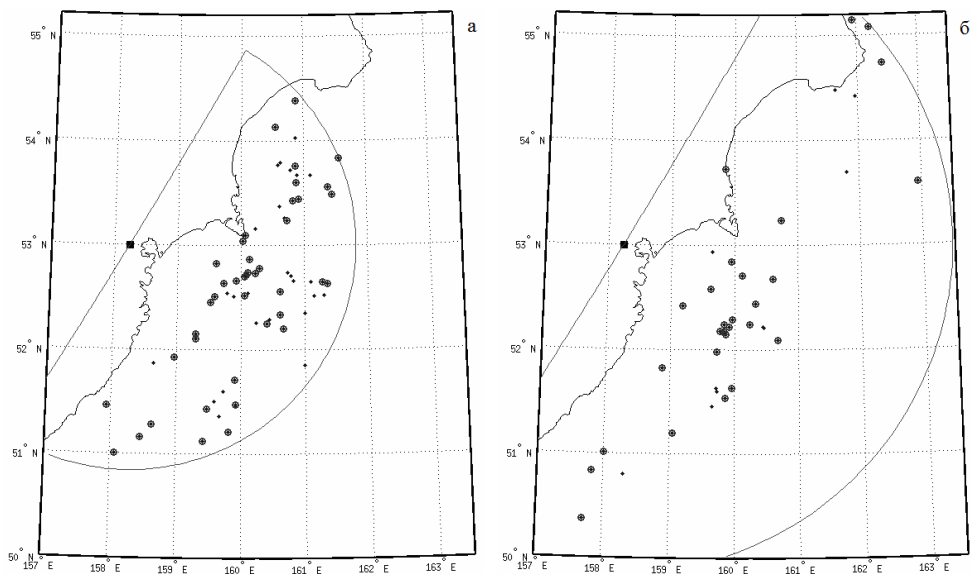


Рис. 7. Землетрясения на карте Камчатки с энергетическими классами $11.0 < K_s \leq 12.0$ (а), $K_s > 12.0$ (б) и эпицентрными расстояниями до пункта наблюдений $D \leq 240$, $D \leq 350$ км соответственно. Квадрат – пункт наблюдений «Микижа». Точки (•) – эпицентры землетрясений, произошедших в период регистрации ГАЭ в условиях спокойной погоды. Точка с окружностью (⊙) означает, что землетрясение предварялось возмущениями ГАЭ. Район выборки землетрясений, использованных при сопоставлении данных, представлен в виде большой полуокружности.

В разделе 3.4 «Анализ появления предсейсмических возмущений атмосферного электрического поля» с учетом критериев, сформулированных в п. 3.1, проанализирован ряд атмосферно-электрических данных за периоды летне-осенних измерений в пункте «Микижа» (2006, 2007 и 2008 гг.) и в пункте «Карымшина» (2009, 2011 и 2012 гг.). Выявлены аномальные возмущения атмосферного электрического поля у поверхности земли, зарегистрированные в условиях описанной выше спокойной погоды.

Как и в п. 3.3, из регионального сейсмического каталога были выбраны две группы землетрясений с энергетическими классами $11.0 < K_s \leq 12.0$ и $K_s > 12.0$, произошедших на эпицентральных расстояниях $D \leq 240$ и $D \leq 350$ км. Считая, что геоакустическая эмиссия является индикатором изменения деформационного состояния приповерхностных пород, для поиска возмущений АЭП выбран временной интервал продолжительностью 2.5 суток перед землетрясениями в соответствии с п. 3.2. Проведено сопоставление выбранных землетрясений с аномальными возмущениями АЭП. В пункте «Микижа» наличие возмущений АЭП рассмотрено перед 16 землетрясениями, в пункте «Карымшина» – перед 11. Полученные результаты сопоставления приведены в табл. 4.

Согласно табл. 4 в пункте «Микижа» возмущения АЭП наблюдались перед 2 землетрясениями из 10 с характеристиками $11.0 < K_s \leq 12.0$ и $D \leq 240$ км и перед 2 из 6 с $K_s > 12.0$ и $D \leq 350$ км. В пункте «Карымшина» возмущения АЭП наблюдались перед 4 из 9 землетрясений с характеристиками $11.0 < K_s \leq 12.0$ и $D \leq 240$ км и перед 1 из 2 с $K_s > 12.0$ и $D \leq 350$ км.

В заключение третьей главы отмечено, что на основе анализа результатов наблюдений атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии предложены критерии выделения их аномальных возмущений. Это позволило выявить возмущения в атмосферном электрическом поле у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии, предшествующие землетрясениям на Камчатке. Количество таких предсейсмических возмущений в электрическом поле значительно меньше, чем возмущений ГАЭ, так как атмосферно-электрические измерения проводились только в летне-осенние периоды и продолжались около трех месяцев в году.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Создан уникальный аппаратно-измерительный комплекс для совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений, который использован для изучения возмущений атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии на Камчатке.
2. В результате натуральных экспериментов зарегистрированы одновременные аномальные возмущения атмосферного электрического поля и геоакустической эмиссии. Они могут проявляться в сейсмически спокойные периоды и на заключительной стадии подготовки землетрясений.
3. Обнаружена связь между возмущениями атмосферного электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии. Наиболее характерной особенностью проявления связи является уменьшение градиента потенциала поля вплоть до изменения знака и его последующее восстановление через некоторое время примерно до прежнего уровня при значительных, как правило, с резким началом и длительностью не менее 15 минут, возмущениях акустического давления в килогерцовом диапазоне частот.
4. Используя непараметрические методы корреляционного анализа, исследована связь между среднечасовыми значениями атмосферного электрического поля, геоакустической эмиссии и метеорологических величин. После исключения случаев плохой погоды, а также выделения слабого влияния неучтенных метеорологических и других факторов в экспериментах 2006 и 2007 гг. обнаружена статистически высокозначимая связь между возмущениями эмиссии и поля.
5. Анализ совместных атмосферно-электрических и геоакустических наблюдений вместе с измерениями деформации земной поверхности с использованием лазерного деформографа–интерферометра показал, что аномальные возмущения электрического поля у поверхности земли и высокочастотной геоакустической эмиссии возникают как одно-временный отклик на деформацию приповерхностных осадочных пород.
6. На основе анализа данных длительных геоакустических наблюдений с использованием численных методов, показано, что предсейсмические аномальные возмущения ГАЭ, которые возникают в период от 2.5 суток до 5 часов перед землетрясениями, являются неслучайными событиями.

Таблица 4. Результаты сопоставления землетрясений с аномальными возмущениями атмосферного электрического поля.

Землетрясения					
класс		11.0 < K_s ≤ 12.0		$K_s > 12.0$	
Пункт наблюдений	Год	Всего	Предваряются возмущениями АЭП	Всего	Предваряются возмущениями АЭП
	2007	3	1	0	0
	2008	3	0	2	1
Карымшпна	2009	2	2	0	0
	2011	3	1	1	1
	2012	4	1	1	0
	Всего	19	6	8	3

7. Исследована статистика появления предсейсмических аномальных возмущений атмосферного электрического поля в летне-осенние периоды 2006–2012 гг. и геоакустической эмиссии в 2003–2012 гг. Полученные результаты можно использовать для изучения сейсмотектонического процесса и разработки методов оценки сейсмической опасности.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах (из перечня ВАК)

1. Ларионов И.А., Щербина А.О., **Мищенко М.А.** Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2005. № 2. С. 108-115.
2. Щербина А.О., **Мищенко М.А.**, Ларионов И.А. Аппаратно-программный комплекс мониторинга геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2005. № 2. С. 128-132.
3. Купцов А.В., Марапулец Ю.В., **Мищенко М.А.**, Руленко О.П., Шевцов Б.М., Щербина А.О. О связи высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных пород с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 71-76.
4. Марапулец Ю.В., Руленко О.П., **Мищенко М.А.**, Шевцов Б.М. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом процессе // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 2. С. 242-245.
5. Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Ларионов И.А., **Мищенко М.А.** Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных пород // Доклады АН. 2011. Т. 440. № 3. С. 403-406.
6. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., **Мищенко М.А.**, Щербина А.О., Солодчук А.А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 59-67.
7. Руленко О.П., Марапулец Ю.В., **Мищенко М.А.** Анализ проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и электрическим полем в атмосфере у поверхности земли // Вулканология и сейсмология. 2014. № 3. С. 53-64.

Публикации в рецензируемых журналах (из перечня РИНЦ)

8. **Мищенко М.А.** Статистический анализ возмущений геоакустической эмиссии, предшествующих сильным землетрясениям на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. 2011. № 1 (2). С. 56-64.
9. Марапулец Ю.В., Ларионов И.А., **Мищенко М.А.**, Щербина А.О., Солодчук А.А., Шевцов Б.М. Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на активизацию пластических процессов в сейсмоактивном регионе // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. 2014. № 6. 146311. 6 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf> (дата обращения: 12.01.2016).

Монография

Марапулец Ю.В., **Мищенко М.А.**, Шадрин А.В., Щербина А.О. Методы исследования высокочастотной геоакустической эмиссии: монография / под общ. ред. Ю.В.Марапулец. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2008. 105 с.

Свидетельства регистрации разработок и баз данных

Мищенко М.А. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 10029 от 19.02.2008 «Программа частотно-временной обработки акустического сигнала».

Мищенко М.А. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 19789 от 24.12.2013 «GRAF версия 7.3».

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

Патент на изобретение

Способ обнаружения высокочастотных геоакустических предвестников землетрясения: пат. 2563338 Рос. Федерация: МПК G01V 1/38 / Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., **Мищенко М.А.**, Шевцов Б.М.; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. № 2013146181/28; заявл. 10.09.2013; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26, 6 с.

Публикации в материалах всероссийских и международных научных мероприятий

Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., **Мищенко М.А.**, Щербина А.О., Шадрин А.В. Система реального времени для обработки сигналов геоакустической эмиссии // Сб. докладов III Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab», СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. С. 1435-1442.

Марапулец Ю.В., Руленко О.П., **Мищенко М.А.**, Ларионов И.А. Синхронные наблюдения геоакустической эмиссии и электрического поля в приземном воздухе на Камчатке // Сб. материалов IV Международного Симпозиума «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы». Бишкек: МНИЦ ГП, 2009. С. 308-313.

Марапулец Ю.В., Ларионов И.А., **Мищенко М.А.**, Щербина А. О. Геоакустическая эмиссия – как индикатор напряженно-деформируемого состояния пород в сейсмоактивном регионе // Сб. тр. XXIV сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 1. М.: ГЕОС, 2011. С. 296-299.

Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Ларионов И.А., **Мищенко М.А.** Одновременные возмущения геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля при деформации приповерхностных пород // Материалы докладов V Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Бишкек: НС РАН, 2012. Т.2. С. 186-189.

Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., **Мищенко М.А.**, Солдчук А.А. Диагностирование приповерхностных пород на Камчатском полигоне методом акусто-деформационного контроля // Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. С. 48-51.

Gordienko V.A., Kuptsov A.V., Larionov I.A., Marapulets Y.V., **Mischenko M.A.**, Sherbina A.O. Anisotropy of high-frequency geoacoustic emission at different stages of seismic event preparation // Proceedings of the XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007), Perugia, Italia, 2007.

Rulenko O.P., Marapulets Y.V., **Mischenko M.A.**, Sherbina A.O. Simultaneous disturbances of high-frequency geoacoustic emission and of electric field in the near-ground air // Proceedings of the XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007), Perugia, Italia, 2007.

Larionov I.A., Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., **Mizhenko M.A.**, Sherbina A.O., Solodchuk A.A. Geoacoustic emission response on deformation process activation during earthquake preparation // Proceedings of the 9th International Conference “Problems of Geocosmos”. SPb.: SPBSU, 2012. P. 158-163.

Mishchenko M.A., Larionov I.A., Marapulets Yu.V., Rulenko O.P. Behavior of atmospheric electric field during acusto-deformation disturbances in Kamchatka // Proceedings of the 10th International Conference “Problems of Geocosmos”. SPb.: SPBSU, 2014. P. 109-111.

Цитируемая литература

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земная кора-атмосфера // Доклады АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 92-97.

2. Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. 2006. № 7. С. 34-51.

3. Войтов Г.И., Добровольский И.П. Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20-31.
4. Гохберг М.Б. Взаимодействие процессов в литосфере и у земной поверхности с внешними оболочками Земли // Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН. 1999. С. 163-169.
5. Двали Е.Р. Электрическое состояние атмосферы и его связь с метеорологическими факторами // Труды Закавказского НИГМИ. Вып. 21 (27). М.: Гидрометеиздат, 1967. С. 83-128.
6. Добровольский И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 189 с.
7. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марापалец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений // Доклады АН. 2007. Т. 413. № 5. С. 96-100.
8. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: ТРТУ, 1998. 122 с.
9. Купцов А.В., Марापалец Ю.В., Шевцов Б.М. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке // Электронный журнал "Исследовано в России". 2004. № 262. С. 2809-2818. [Электронный ресурс]. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf> (дата обращения: 28.12.2012).
10. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59-65.
11. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45-59.
12. Ларионов И.А. Акустическая эмиссия деформаций осадочных пород: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.06. 2008. 97 с.
13. Липеровская Е.В. Применение численного моделирования – метода Монте-Карло при анализе сейсмоионосферных эффектов // Сборник докладов IV международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». П-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007, доп. том, С. 32-54.
14. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57-68.
15. Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45 № 2. С. 282-287.
16. Спивак А.А. Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. М.: ГЕОС, 2006. С. 186-195.
17. Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В., Кривашеев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61-70.
18. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество / пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
19. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect // J.Atmos. and Terr. Phys. 1967. V. 29, N. 6. P. 709-721.
20. Pierce E.T. Some topics in atmosphere electricity. Resent advances in atmospheric electricity. Pergamon Press. New York, 1958. P. 5-15.