

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ И АЭРОНОМИИ ИМ. Ю.Г. ШАФЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Аргунов Вячеслав Валерьевич

**ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛАХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
НА ВОСТОКЕ СИБИРИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

Петропавловск-Камчатский – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Козлов Владимир Ильич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, ведущий научный сотрудник лаборатории радиоизлучения ионосферы и магнитосферы.

Официальные оппоненты: **Гаврилов Валерий Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Петропавловск-Камчатский, ведущий научный сотрудник лаборатории геодезии и дистанционных методов исследований.

Копытенко Юрий Анатольевич, профессор, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, директор, заведующий отделом геомагнитных исследований.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ.

Защита состоится 16 октября 2018 г. в 14 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: 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа Б.И., 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайте: www.imgg.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте www.imgg.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: andreeva-mu@mail.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

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

М.Ю. Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Исследование землетрясений, главным образом, направлено на обеспечение безопасности жизнедеятельности человека. С развитием человеческой цивилизации и технической оснащенности жизни человека, явления природы несут возрастающую угрозу для человека. По данным статистики [Шестопапов, 2004], землетрясения стоят на первом месте среди стихийных бедствий по масштабу ущерба и числу уносимых человеческих жизней. В первую очередь это относится к сильным землетрясениям, магнитуда которых более пяти [Липеровская, 2007; Хакимов, 1989]. Достаточно отметить последствия сильнейших землетрясений в Индонезии 23.12.2009 г., на Гаити 12.01.2010 г. и в Японии 11.03.2010 г., которые привели к масштабному разрушению городов и человеческим жертвам.

Изучение литосферно-ионосферных связей является одним из направлений исследований сейсмических процессов в земной коре. Выявления и обоснование предвестников землетрясений является одной из основных научных задач данных исследований. Поиски достоверных индикаторов готовящихся литосферных возмущений продолжаются уже не один десяток лет, но, к сожалению, до настоящего времени ни одни из методов краткосрочного прогнозирования не дает точных результатов. Для повышения достоверности прогнозов необходимо комплексное использование различных методик поиска достоверных предвестников землетрясений.

Важным методом исследования литосферно-ионосферных связей является регистрация электромагнитных сигналов [Poddelsky, 2001; Поддельский, 2004], которая может быть разделена на два направления: первое основывается на приеме возможных электромагнитных излучений из области эпицентра землетрясения, а второе - на использовании электромагнитных сигналов для дистанционного мониторинга сейсмических эффектов в нижней ионосфере (при прохождении сигналов над сейсмоактивными областями). Как показано в ряде работ (например, в [Науакawa, 2004; Медведев, 1992]) по исследованию ионосферных возмущений над областями сильных землетрясений, ионосфера весьма чувствительна к сейсмическим воздействиям.

Для исследования литосферно-ионосферных связей наиболее широко привлекаются электромагнитные сигналы искусственного происхождения (сигналы радиостанций) в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) [Козлов, 2004; Липеровский, 1992]. В работах [Gokhberg, 1994; Поддельский, 2004, Липеровская, 2007] доказано, что вариации фазы и амплитуды сигналов низкочастотных радиопередатчиков, наблюдаемых за несколько дней до землетрясений, могут быть использованы в качестве предвестников литосферных

возмущений. Сигналы сверх длинноволновых (СДВ) радиостанций имеют контролируемые характеристики, то это позволяет достаточно точно рассчитывать амплитудно-фазовые вариации, по которым, в конечном итоге, можно восстанавливать параметры возмущений в нижней ионосфере. В то же время, из-за стационарности источников, не всегда удается подобрать трасу распространения сигналов СДВ радиостанций, проходящих над эпицентрами землетрясений. Нами предлагается расширить возможности метода, используя естественные ОНЧ-сигналы – электромагнитное излучение от грозových разрядов.

В данной работе впервые исследуются проявления литосферно-ионосферных связей в ОНЧ-сигналах грозового происхождения (такие сигналы принято называть атмосфериками [Раков, 1993]), распространяющихся над эпицентрами землетрясений. Благодаря малому затуханию атмосферика могут распространяться в волноводе «Земля-ионосфера» на многие тысячи километров от грозовых источников, вплоть до огибания Земли [Козлов, 2004]. Изменения параметров атмосфериков в процессе их распространения от источника несут в себе информацию об электронной концентрации и высоте спокойной, а также и возмущенной, нижней ионосферы.

В диссертационной работе предлагаемая методика дистанционного мониторинга сейсмических возмущений в нижней ионосфере с помощью сигналов грозовых разрядов рассматривается на основе результатов исследований, полученных в г. Якутске и позволяющих изучать сейсмоактивные регионы в восточном направлении (Камчатка), в южном – Китай, Япония, Филиппины, Индонезия, а также частично в западном - Алтай, Средиземноморье.

Целью работы является исследование эффектов литосферных процессов в параметрах импульсных грозовых ОНЧ электромагнитных сигналах, отражающих появление сейсмических возмущений в нижней ионосфере.

Задачи исследования:

1. Разработать методику дистанционного мониторинга сейсмических возмущений в нижней ионосфере (над сейсмоактивными регионами) с помощью импульсных ОНЧ сигналов от грозовых разрядов.
2. Исследовать амплитудные вариации сигналов атмосфериков, распространяющихся в волноводе «Земля-ионосфера» над областями эпицентров землетрясений, с целью выявления сейсмических возмущений в нижней ионосфере.

3. Изучить параметры землетрясений, оказывающих влияние на условия распространения сигналов грозовых разрядов.
4. Рассмотреть модели ионосферных возмущений, удовлетворяющих наблюдаемым характеристикам сейсмических эффектов в сигналах атмосфериков на трассах, проходящих над областями эпицентров землетрясений.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые детально рассмотрены проявления сейсмических эффектов в нижней ионосфере в вариациях характеристик электромагнитного излучения грозовых разрядов (атмосфериков), используя инструментальные наблюдения за грозовой активностью и модельные расчеты трасс распространения грозовых сигналов в волноводе "Земля-ионосфера". Впервые выявлены особенности проявлений эффектов и предвестников землетрясений в данных сигналах в зависимости от параметров землетрясений (магнитуда, глубина очага), мест расположения эпицентров относительно приемного пункта и времени суток приема сигналов.

Научная и практическая значимость работы определяется тем, что полученные в работе результаты позволяют предложить новую методику дистанционного мониторинга за ионосферными возмущениями над эпицентрами землетрясений с помощью электромагнитных сигналов грозовых разрядов, которая может использоваться в комплексном мониторинге эффектов и предвестников землетрясений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что ионосферные эффекты литосферных процессов проявляются в электромагнитных сигналах грозовых разрядов, проходящих над эпицентрами землетрясений, в виде повышения их среднечасовой амплитуды в день события или в течение одного-трех последующих дней. В интервале 12 дней до сейсмических событий также может наблюдаться усиление амплитуды сигналов, которое рассматривается в качестве предвестника землетрясений.
2. Выявлено, что эффекты в нижней ионосфере характерны для землетрясений с магнитудами более 4 и глубиной очага не более 50-70 км. Более глубоководные землетрясения (с глубиной очага более 100 км) дают ионосферные эффекты существенно реже с несколько отличающейся временной последовательностью.
3. Установлено, что экспериментально регистрируемые вариации характеристик сигналов от грозовых разрядов в периоды сильных сейсмических событий в общем случае могут

быть объяснены усилением крутизны высотного профиля электронной концентрации (повышением концентрации) в нижней ионосфере и увеличением высоты волновода.

Достоверность результатов, представленных в настоящей работе, обусловлена использованием физически обоснованных методов измерений и анализа экспериментальных результатов и комбинированием различных методов наблюдений. Основные полученные экспериментальные результаты и выводы согласуются с опубликованными результатами в работах других авторов.

Теоретическое и практическое значение

Представлена новая методика для дистанционного мониторинга ионосферных возмущений над эпицентрами землетрясений с применением импульсных ОНЧ электромагнитных сигналов от грозовых разрядов. Методика позволяет проводить мониторинг сразу за несколькими сейсмоактивными областями.

Результаты работы указывают на существование возможных ионосферных предвестников землетрясений, проявляющихся за несколько дней до литосферного возмущения.

Представленная методика может быть использована в комплексе с другими направлениями поиска предвестников землетрясений для повышения достоверности прогноза.

Личный вклад автора

Представленные результаты являются оригинальными и получены при непосредственном участии автора. Автор принимал участие в постановке научной задачи и получении экспериментальных данных. Модернизация и отладка грозопеленгаторов-дальномеров, в которой принимал участие диссертант, позволили получить качественные экспериментальные данные. Автор осуществил обработку материала с помощью разработанной методики, провел анализ полученных результатов, принял непосредственное участие в формировании выводов.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на семинарах ИКФИА СО РАН и докладывались на следующих научных конференциях:

40th COSPAR Scientific Assembly (г. Москва, 2014 г.), Collaborative Conference on Earthquake Science and Engineering (Chengdu, China, 2015 г., *приглашенный доклад*)

Collaborative Conference on Earthquake Science and Engineering (Budapest, Hungary, 2016 г., *приглашенный доклад*), EuroSensors (Budapest, Hungary, 2016 г.), Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Новосибирск 2014 г. Томск, 2016 г.) 11ая международная конференция «Проблемы Геокосмоса» (Санкт-Петербург, 2016 г.), Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2012 г., 2016 г.), Международная Байкальская школа по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2011, 2013 гг.), Лаврентьевские чтения (г. Якутск, 2012-2015 гг.), Всероссийская конференция «Космические лучи и гелиосфера» (Якутск, 2012 г), Всероссийский форум научной молодежи ЭРЭЛ (г. Якутск, 2011, 2012, 2014 гг.), V Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и экономике» (г. Якутск, 2014 г).

Отдельные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и были поддержаны грантами РФФИ №15-45-05135-р_восток_а, № 15-45-05005-р_восток_а, 14-05-31056 мол_а. По тематике работы был получен грант "Научно образовательного фонда поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия) № 2014-01-006 на тему "Исследования вариаций амплитуды грозových радиосигналов, проходящих над эпицентрами землетрясений".

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах, из них 3 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 177 страницах, включает в себя 72 рисунка, 2 таблиц, 132 библиографические ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены цели, основные задачи работы, актуальность и степень разработанности темы исследования, научная новизна, практическая значимость, основные результаты, выносимые на защиту. Дается краткое содержание глав.

В первой главе дан обзор материалов, посвященных исследованию литосферно-ионосферных связей. Рассмотрены результаты исследований сейсмических возмущений в ионосфере различными методами.

Вследствие характера объекта все основные методы являются дистанционными и основаны на радиоволновом зондировании. Это, прежде всего, спутниковое и наземное вертикальное (наклонное) зондирование ионосферы с использованием ионосферных станций, радиопросвечивание ионосферы сигналами спутниковых навигационных систем (томография), дистанционный мониторинг возмущений нижней ионосферы с использованием сигналов СДВ радиостанций и др.

Все используемые методики подтверждают возникновение ионосферных аномалий, обусловленных сейсмическими процессами. Возмущения концентрации электронов в нижних (D- и E-) областях ионосферы наблюдаются на фоне малых значений плотности частиц, вследствие чего наиболее приемлемым (практически единственным) методом их наблюдения является дистанционный мониторинг сигналами СДВ и СВ радиостанций, распространяющихся в волноводе «Земля-ионосфера».

Одни из наиболее показательных результатов дистанционного мониторинга сейсмо-ионосферных возмущений с использованием сигналов СДВ радиостанций представлены в работе [Науакawa, 1996]. Рассматриваются эффекты от землетрясений в Кобе (Япония) в 1995 году. Проведенный анализ проявления землетрясений в радиосигналах позволил получить особенности эффектов в зависимости от сейсмических параметров (магнитуда, глубина очага, место расположения очагов). Выявлено, что эффекты временного сдвига терминатора нижней ионосферы связаны с наиболее частыми мелкофокусными (глубина очага не более 30 км) землетрясениями с магнитудой более шести, а также с литосферными возмущениями на несколько больших глубинах (очаг на глубинах от 30 до 100 км). В то же время, ионосферных эффектов от глубокофокусных (очаг на глубинах больше 100 км) землетрясений не было обнаружено. Однако, как показывают наши исследования [Argunov, 2015; Mullayarov, 2014], а также последующие работы коллектива авторов [Molchanov, 1998], глубокофокусные землетрясения могут оказывать влияния на ионосферу.

При использовании сигналов СДВ радиостанций основным достоинством является то, что параметры сигналов источника известны, это позволяет проводить мониторинг за

изменениями условий распространения сигналов в волноводе «Земля-ионосфера». В то же время, несмотря на большое количество передающих станций, не всегда удается подобрать подходящую трассу распространения от источника к приемнику, так чтобы сигналы проходили над эпицентром землетрясения.

Во второй главе приводится описание грозопеленгатора-дальномера, по данным которого выполнена диссертационная работа, а также приводится описание метода дистанционного мониторинга ионосферных возмущений от землетрясений по вариациям параметров сигналов грозовых разрядов.

Для основной регистрации импульсных ОНЧ сигналов от грозовых разрядов (атмосфериков) используется грозопеленгатор-дальномер, расположенный на радиофизическом полигоне ($61^{\circ}55' \text{ N}$, $129^{\circ}21' \text{ E}$) в 25 км от города Якутска (для уменьшения влияния индустриальных помех). Грозопеленгатор-дальномер состоит из антенной системы, усилителей сигналов и регистрирующей части. Антенная система включает в себя две ортогональные магнитные рамки и одну электрическую вертикальную антенну.

Для определения азимута прихода сигналов используются ортогональные магнитные антенны, выполненные в виде рамок ромбической формы, закрепленных на общей металлической штанге. Данная антенная система позволяет вести наблюдения как за местными грозами, так и планетарными грозовыми очагами, в зависимости от выставленного порога регистрации сигналов.

На рисунке 1 представлена структурная схема приемно-усилительного тракта грозопеленгатора-дальномера. Сигналы с антенного комплекса усиливаются предварительными усилителями, затем по симметричным кабельным линиям через разделительные трансформаторы подаются на оконечные усилители и АЦП, далее происходит обработка сигналов и запись их амплитудно-временных параметров на персональном компьютере.

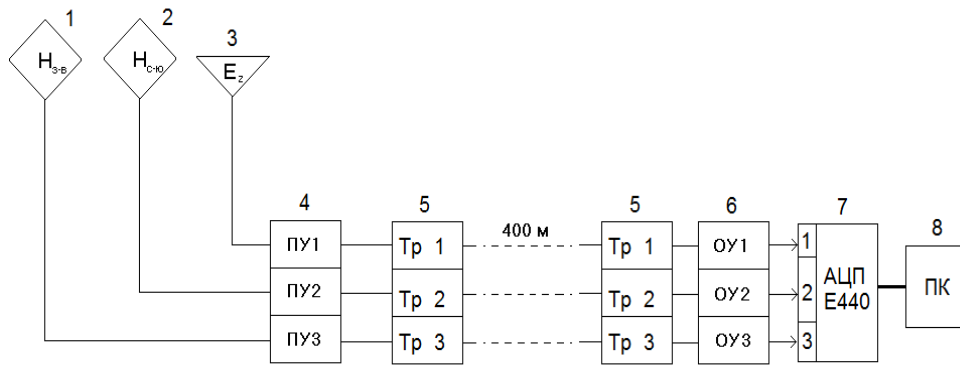


Рисунок 1 – Структурная схема приемно-усилительного тракта пеленгатора. На рисунке цифрами обозначены: 1 - рамочная антенна запад-восток; 2 - рамочная антенна север-юг; 3 – вертикальная штыревая антенна; 4 – предварительный усилители (ПУ); 5 – разделительные трансформаторы; 6 – окончательный усилители (ОУ); 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – персональный компьютер

В канале электрической антенны применен антенный усилитель для согласования большого внутреннего сопротивления электрической антенны с последующими усилительными каскадами. Предварительные малошумящие усилители (ПУ), идентичные для всех каналов, подключаемые через трансформаторные входы усиливают сигналы в полосе частот 0,3-60 кГц, обеспечивают необходимую величину сигналов при передаче данных по кабельным линиям связи. Разделительные трансформаторы установлены на обоих концах линий - для уменьшения помех наведенной на длинную линию. Оконечные усилители (ОУ) обеспечивают согласование с линиями связи и наиболее эффективное использование динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Частота дискретизации АЦП – 400 кГц. Усиление всего тракта подобрано таким образом, что порог отбора атмосфериков для регистрации, составляющий на входе АЦП 50 мВ, соответствует сигналу на входе электрической антенны 150 мВ/м. В связи с широкополосностью сигналов в грозопеленгаторе используется среднеквадратичная амплитуда.

Для выделения эффектов сейсмических возмущений в ионосфере анализируется среднечасовая амплитуда атмосфериков, чьи источники - грозовые разряды, располагаются за эпицентром. Амплитуда отдельного атмосферика предварительно корректируется путем учета затухания сигнала на трассе от источника до эпицентра землетрясения, полагая в грубом приближении обратно пропорциональную зависимость от расстояния.

В качестве основных рассматриваются вариации среднечасовой амплитуды атмосфериков, зарегистрированных в ночные часы в пункте приема (00–02 LT или 15–17 UT), когда из-за меньшего затухания регистрируется большое число атмосфериков, - в наших исследованиях - до 8000-12000 импульсов в час со всех направлений. Однако на трассах с условиями затененности интерференционные эффекты, возникающие за счет распространения сигналов в волноводе в виде нескольких мод, могут исказить результаты измерения амплитуды, поэтому дополнительно рассматривались вариации средней амплитуды атмосфериков и в дневные часы.

При проведении дистанционного мониторинга сейсмо-ионосферных возмущений определяется азимут и расстояние до Якутска для каждого выбранного землетрясения. Для начального выявления сейсмических эффектов выбираются атмосферерики, трассы распространения которых проходят на расстоянии не более размеров пятой зоны Френеля от эпицентра, а дальности их источников - грозовых разрядов, превышают дальность до землетрясения. Для расчета зон Френеля, принята частота 10 кГц, в окрестности которой, как правило, амплитуда атмосфериков имеет максимальное значение. Определяется средняя амплитуда атмосфериков, зарегистрированных в течение часа (обычное количество зарегистрированных атмосфериков – порядка и более 1000) с выделенного направления на эпицентр землетрясения. При исследовании размеров ионосферных возмущений применяется азимутальное сканирование - рассчитывается амплитуда атмосфериков со смежных направлений относительно направления на эпицентр землетрясения.

В третьей главе приводятся основные результаты по дистанционному мониторингу за ионосферными возмущениями над сейсмоактивными регионами с использованием электромагнитных сигналов от грозовых разрядов.

По результатам наблюдений атмосфериков получено, что ионосферные эффекты землетрясений проявляются в усилении среднечасовой амплитуды атмосфериков обычно в 2-3 раза (максимально – в 7-8 раз) в день или в интервале трех дней после события. Возможные предвестники литосферных и более глубоких возмущений также проявляются, как правило, в однодневном (в течение одного - нескольких часов) возрастании амплитуды атмосфериков в среднем за 4-10 дней до событий. Также в части наблюдаемых эффектов в амплитуде сигналов примечателен минимум, предшествующий нулевому дню (за 1-3 дня до события), который дополняет общую картину проявления сейсмических событий в вариациях амплитуды сигналов, проходящих над эпицентрами землетрясений.

Анализ вариаций параметров электромагнитных сигналов от грозовых разрядов показывает, что сейсмические эффекты в нижней ионосфере проявляются в вариациях амплитуды в случае землетрясений с магнитудами более четырех.

На рисунке 2 приведен пример вариаций амплитуды сигналов ночных грозовых разрядов в случае землетрясения, которое произошло в Японии (эпицентр 41.892° N; 143.754° E, магнитуда 6.9) 11.09.2008 г. Расстояние от эпицентра землетрясения до пункта регистрации составляло 2400 км, а основные грозовые источники сигналов по азимуту на эпицентр регистрировались на дальностях 4200–5600 км от пункта наблюдения. Одновременно рисунок показывает результаты азимутального сканирования (прием сигналов с меньших и больших азимутов относительно направления на эпицентр землетрясения, в данном случае с шагом 10 град.). Хорошо выраженный эффект землетрясения (пиковая амплитуда атмосфериков 12.09.2008 г. в четыре раза превышает уровень в предшествующие три дня) и подобное возрастание амплитуды 05.09.2008 г., которое рассматривается как предвестник землетрясения, наблюдались только с направления на эпицентр землетрясения.

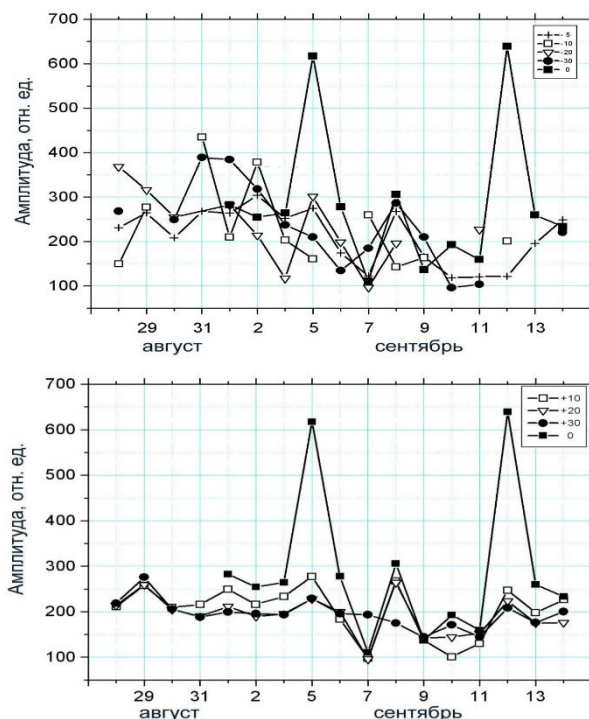


Рисунок 2 – Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков, принимаемых с меньших (а) и больших (б) азимутов относительно азимута на эпицентр землетрясения (отмечен как 0°) 11.09.2008 г.

Второй пример (рисунок 3) относится к катастрофическому сейсмическому событию, которое фактически следует рассматривать как два сильных литосферных возмущения, произошедших один за другим (09 и 11 марта 2011 г.) практически в одном месте - недалеко от побережья о. Хонсю, Япония ($\varphi_1 = 38.44^\circ \text{ N}$, $\lambda_1 = 142.84^\circ \text{ E}$, $\varphi_2 = 38.297^\circ \text{ N}$, $\lambda_2 = 142.372^\circ \text{ E}$, расстояние между эпицентрами около 40 км). Магнитуда первого землетрясения составляла 7.3, а второго, с катастрофическими последствиями - 9.0.

Дальность до эпицентра указанных сильных землетрясений составляла около 2800 км, азимут (относительно направления на север) - 155° . На рисунке 3 приведены вариации амплитуды атмосфериков, определяемой в 16-17 LT (данный часовой интервал приходится на время максимальной грозовой активности в сутках) для месячного периода (февраль-март). Атмосферики принимались с направления на эпицентр сильнейшего землетрясения 11 марта 2011 г., т.е. с азимута 155° .

Первое землетрясение 09 марта 2011 г. практически не проявилось в вариациях амплитуды (пик 10 марта 2011), а вот после второго литосферного возмущения последовало двукратное усиление амплитуды 13 марта 2011 г. Предшествующие землетрясению пики 25 марта и 28 марта 2011 г., обозначенные на рисунке 3 цифрами 1 и 2, можно трактовать как предвестники землетрясений. Считая, что первое возрастание амплитуды соответствует первому землетрясению 09 марта, а второе возрастание - землетрясению 11 марта 2011 г., исходя из этого, первый предвестник наблюдался за 12 дней до события, а второй предвестник - за 11 дней до события. Таким образом, несмотря на то, что два литосферных возмущения развивались одно вслед за другим с небольшим разрывом по времени, картина эффектов землетрясений и их предвестников оказалась вполне типичной для каждого.

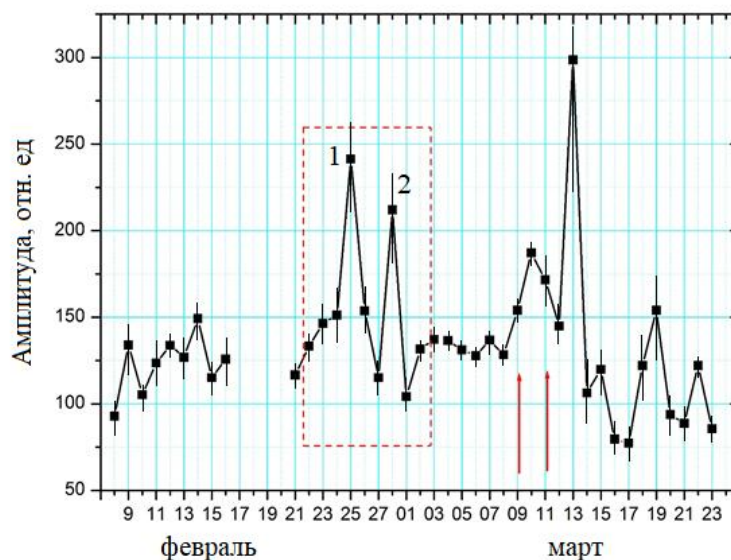


Рисунок 3 – Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков с направления на эпицентры землетрясений 09 и 11 марта 2011 г. Вертикальными линиями указаны среднеквадратические значения ошибок определения средних значений

В работах [Biagi, 2004; Gokhberg, 1994; Гохберг 1988] проводились исследования лишь коровых землетрясений глубина очага которых, не превышает 50 км, при этом влияние глубокофокусных литосферных возмущений не изучалось. Однако по результатам наших исследования установлено [Argunov, 2015; Mullayarov, 2014], что даже глубокофокусные землетрясения могут иметь предвестники в виде возмущений нижней ионосферы, которые проявляются в таком же повышении амплитуды сигналов грозовых разрядов, как в случае коровых землетрясений. Но при этом обнаружено, что в значительной части глубокофокусных событий временные соотношения отличаются от соответствующих соотношений мелкофокусных землетрясений: в рассмотренных событиях предвестники глубокофокусных землетрясений чаще наблюдались практически непосредственно перед событием - за один-два дня до землетрясения.

В периоды усиления амплитуды атмосфериков зарегистрированы цуги квазипериодических вариаций амплитуды, которые, в совокупности с запаздыванием эффектов землетрясений относительно времени самих событий, могут свидетельствовать в пользу передачи энергии литосферных процессов в нижнюю ионосферу с помощью атмосферных гравитационных волн.

Так же был установлен еще один фактор, связанный с изменением характеристик сигналов грозовых разрядов под воздействием сейсмических событий. Было обнаружено, что за несколько дней до землетрясения значение отношения компонентов

электромагнитного поля E_z/H_t (где E_z - вертикальная составляющая поля, H_t - горизонтальная составляющая) падает.

Таким образом, установлено, что наблюдения низкочастотных электромагнитных сигналов грозовых разрядов (атмосфериков) могут быть использованы в качестве одного из средств комплексного мониторинга возмущений нижней ионосферы, обусловленных сейсмическими процессами. Методика позволяет выявлять как эффекты землетрясений, так и их предвестники. Одним из главных плюсов представленной методики является возможность проведения мониторинга сейсмических возмущений в нижней ионосфере одновременно по разным азимутальным секторам, а также возможность проведения азимутального сканирования области над эпицентром конкретного события с целью уточнения местоположения возмущения в нижней ионосфере.

В четвертой главе приведены расчеты по модели Wait и Spies [Wait, 1964] амплитудно-спектральных вариаций низкочастотных импульсных радиосигналов от грозовых разрядов, распространяющихся в волноводе "Земля-ионосфера", при воздействии сейсмических возмущений на ионосферу. Параметры сейсмического возмущения в ионосфере задавались через его высоту (высота волновода), крутизну профиля электронной концентрации, поперечные размеры области возмущения и ее расположения на трассе относительно источников сигналов (грозовых очагов) и пункта их приема. В соответствии с типичными реальными значениями, оцениваемых по наблюдениям в Якутске, расстояние от пункта приема сигналов до сейсмического возмущения принималось равным 2000 км, а максимальная дальность до источника сигналов – обычно до 8000 км. Принято, что локализованный участок возмущения может иметь протяженность вдоль трассы в пределах от 500 до 1500 км.

Исходные модельные значения высоты волновода и крутизны профиля электронной концентрации задавались по данным, приведенным в работах [Borgman, 1993; Ferguson 1993; Hayakawa, 2010; Bannister, 1985, 1986, 1999]. Типичные значения высоты волновода в дневных условиях 60-75 км, а в ночных условиях – 80-95 км. Под крутизной принятого в расчетах экспоненциального профиля электронной концентрации (параметра β), определяющего условия отражения волн от ионосферы, понимается обратная величина высоты однородной ионосферы (нижние D- и E-области). В дневных условиях параметр β лежит в пределах от 0.25 до 0.33 км⁻¹, а в ночных условиях – от 0.3 до 0.7 км⁻¹.

На рисунке 4 показана зависимость уровня сигнала от параметра β в ночных условиях при высоте волновода 80 км и дальности 4000 км до источников.

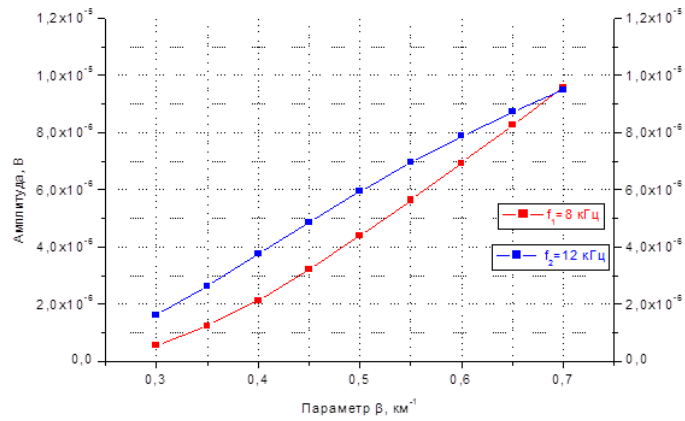


Рисунок 4 – Зависимость уровня сигнала от параметра β в ночных условиях при высоте волновода 80 км и дальности 4000 км от источника

При увеличении параметра β амплитуда сигнала приблизительно линейно возрастает. Полное увеличение амплитуды сигнала по всему диапазону возможных значений β (от 0,3 до 0,6 км⁻¹, значение $\beta = 0,7$ км⁻¹ практически не реализуется) составляет около 4 раз. Для часто наблюдаемого в сейсмо-эффектах усиления средней амплитуды грозовых сигналов в 1,5-2 раза при данных параметрах достаточно возрастания крутизны профиля β в 1,3 раза. Увеличение высоты ночного волновода (при неизменном β) также приводит к некоторому возрастанию уровня сигнала, но высота более важна для проявления изменения крутизны профиля электронной концентрации. Следовательно, конкретное проявление в ОНЧ сигналах эффекта воздействия литосферных процессов на ионосферные параметры определяется одновременно изменением профиля электронной концентрации (параметра β) и изменением высоты волновода. Одновременное сочетание факторов может обеспечить более существенное возрастание амплитуды ОНЧ-сигналов во время воздействия литосферных процессов на ионосферу. При этом для оценочных значений поперечных размеров области ионосферного возмущения существенную роль в ночных условиях играет интерференция мод сигнала в области частот спектрального максимума.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

1. Получено, что ионосферные эффекты землетрясений проявляются в сигналах атмосфериков в виде усиления среднечасовой амплитуды в день или в интервале трех дней после события. Возможные предвестники литосферных возмущений проявляются,

как правило, в однодневном (в течение одного - нескольких часов) возрастании амплитуды атмосфериков в среднем за 4-10 дней до событий.

2. С помощью дистанционного мониторинга сейсмо-ионосферных возмущений, установлены параметры землетрясений с наибольшей вероятностью проявления в данных электромагнитных сигналах. Сейсмические эффекты в нижней ионосфере возможны в случае землетрясений с магнитудами более четырех и, как правило, имеющих очаг на глубинах не более 50-70 км.

3. Установлено, что глубокофокусные землетрясения также могут иметь предвестники в виде возмущений нижней ионосферы, проявляющиеся в виде повышения амплитуды сигналов грозových разрядов, как и в случае мелкофокусных землетрясений. Предвестники глубокофокусных землетрясений чаще наблюдаются непосредственно перед событием, за один - два дня до землетрясения.

4. Обнаружено, что за несколько дней до землетрясения значение отношения компонентов электромагнитного поля E_z/H_t может падать (E_z – вертикальная электрическая компонента, H_t – горизонтальная магнитная).

5. Установлено, что размеры возмущений, вызываемых землетрясениями, обычно не больше размеров пятой зоны Френеля для частот спектрального максимума сигналов (около 10 кГц), что составляет ~1000 км для типичных условий наблюдения в г. Якутск, а их предвестников - не больше размеров первой зоны Френеля.

6. Показано, что регистрирующиеся в амплитудно-спектральных вариациях низкочастотных радиосигналов возрастания амплитуды сигналов от грозových разрядов в периоды сильных сейсмических событий могут быть объяснены увеличением крутизны профиля электронной концентрации (повышением концентрации) и/или повышением высоты волновода.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Mullayarov, V.A. Ionospheric effects of earthquakes in Japan in March 2011 obtained from observations of lightning electromagnetic radio signals / V.A. Mullayarov, **V.V. Argunov**, L.M. Abzaletdinova, V.I. Kozlov // Natural Hazards and Earth System Science. – 2012. – N. 12. – P. 3181-3190.

2. Mullayarov, V.A. Variations of VLF radio signals and atmospheric effects during the deep earthquake with $M=8.2$ occurred on 24 May 2013 near Kamchatka peninsula / V.A. Mullayarov, **V.V. Argunov**, G.I. Druzhin, L.M., Abzaletdinova, A.N. Melnikov // Natural Science. – 2014. – Vol. 6, N. 3. – P. 144-149.

3. Муллаяров, В.А. Вариации параметров грозových электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений / В.А. Муллаяров, Л.М. Абзалетдинова, **В.В. Аргунов**, А.А. Корсаков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 6. – С. 841-851.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

1. Argunov V. V., Mullayarov V. A. Variations of the amplitude of lightning electromagnetic signals passing over epicenters of deep-focus earthquakes //XXI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – С. 96805J-96805J-7

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2473152>

2. Mullayarov V. A., Argunov V. V., Abzaletdinova L. M. Remote sensing of seismic disturbances in the lower ionosphere according to observations of lightning electromagnetic signals in Yakutsk //XXI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – С. 96805W-96805W-7.

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2473165>

3. Argunov V. V. Modelling consideration of amplitude variations of signals of lightning discharges with the availability of disturbances in the earth-ionosphere waveguide //XXII International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – С. 100356A-100356A-4.

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2589720>

4. Argunov V. V., Mullayarov V. A. Variations of impulsive natural VLF signals passing over epicenters of earthquakes by observations in Yakutsk //20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – С. 92924J-92924J-7.

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1984425>

5. Аргунов В. В. Расчет спектров сигналов атмосфериков, распространяющихся в волноводе «земля-ионосфера», над сейсмоактивными регионами //Наука и образование. – 2017. – №. 2. – С. 53-56.