

МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Золотов Олег Владимирович

**ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В ВАРИАЦИЯХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
ИОНОСФЕРЫ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Мурманск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Федерального агентства по рыболовству «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «МГТУ», г. Мурманск)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Мурманский
государственный технический университет»
НАМГАЛАДЗЕ Александр Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник ФГБУН «Институт космических
исследований» Российской академии наук
ПУЛИНЕЦ Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
университет»
СМИРНОВА Наталья Алексеевна

Ведущая организация: Западное отделение ФГБУН «Институт земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова» Российской академии наук

Защита диссертации состоится «__» _____ 2015 г. в _____ на заседании
диссертационного 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 ФГБОУ ВПО «Санкт-
Петербургский государственный университет» и на сайте по адресу
<http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/470> .

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

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

Кубышкина М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Задача прогноза землетрясений, будучи чрезвычайно важной из-за огромного количества человеческих жертв в результате сильных сейсмических событий и их влияния на инфраструктуру и среду обитания человека, до настоящего времени не решена. Изначально надежды на её решение связывались с наращиванием традиционных для сейсмологии средств наблюдений, таких как сети сейсмических станций, а поиск предвестников землетрясений основывался на анализе записей сейсмографов, данных по деформациям земной коры, геохимическим параметрам, магнитным и электрическим полям и др. Отсутствие успехов в построении надёжной методики прогноза землетрясений традиционными средствами мониторинга сейсмической активности привело к пониманию необходимости междисциплинарного подхода.

Неотъемлемой частью задачи прогноза землетрясений является обнаружение их предвестников, в том числе в параметрах ионосферной плазмы, реагирующей на воздействия «сверху» – от Солнца и околоземного космоса, – и «снизу» – от особенностей тропосферной циркуляции, рельефа местности, тайфунов, циклонов, извержений вулканов, цунами, землетрясений, техногенных катастроф. Реакция ионосферы на изменения солнечной и геомагнитной активности проявляется преимущественно в виде геомагнитных бурь и суббурь, перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) и внезапных ионосферных возмущений (ВИВ).

В последние годы появилось множество работ, посвящённых исследованию аномальных вариаций ПЭС (полное электронное содержание – количество электронов, содержащихся в столбе единичного сечения с основанием у поверхности Земли и до высоты пролёта спутника или некоторой эталонной высоты) ионосферы в качестве возможных предвестников землетрясений. Всплеск публикаций связан с развитием сети наземных приёмников сигналов спутников навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS), обеспечивающих радиопросвечивание ионосферы на частотах 1.2 ГГц и 1.5 ГГц, и с появлением в 1998 г. глобальных карт ПЭС ионосферы, что позволило начать в них поиск особенностей, связанных с протекающими в литосфере процессами подготовки сильных сейсмических событий. Обобщение результатов исследований морфологических особенностей вариаций ПЭС перед землетрясениями позволило выявить существование связи между сильными сейсмическими событиями и возмущениями ПЭС, оценить пространственные и временные масштабы сейсмогенных аномалий. Тем не менее, интенсивность возмущений ПЭС от геомагнитных бурь и суббурь сопоставима по величине или превосходит сейсмогенные возмущения ПЭС ионосферы, поэтому следует установить признаки, позволяющие выделять сейсмогенные аномалии

на фоне геомагнитных возмущений, чтобы иметь возможность для построения средств автоматической идентификации предвестников. Однако к настоящему времени общепринятая схема развития сейсмогенных ПЭС-аномалий не разработана, а приводимые признаки аномалий и их количественные оценки зачастую противоречивы из-за отсутствия единой методики обработки и анализа данных GPS-мониторинга в целях выявления предвестников землетрясений. Физические механизмы связи литосферных процессов подготовки землетрясений и порождаемых ими ионосферных возмущений являются предметом научной дискуссии. Гипотезы о физических механизмах осуществления литосферно-ионосферных взаимодействий детально не проработаны с использованием современных методов физико-математического моделирования. В то же время вариации, связанные с сильными землетрясениями и процессами их подготовки, – это один из видов изменчивости ионосферы, который нужно учитывать при моделировании связей системы «литосфера-атмосфера-ионосфера».

Целью диссертационной работы является исследование ионосферных эффектов процессов подготовки сильных $M_w \geq 5$ землетрясений в вариациях ПЭС с применением методов физико-математического моделирования и статистического анализа данных наблюдений.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены автором следующие задачи:

1) Выявить в ПЭС ионосферные эффекты процессов подготовки $M_w \geq 5$ землетрясений в околоэпикентральной и магнитосопряжённой к ней областях путём анализа ряда конкретных сильных сейсмических событий для различных гелиогеофизических условий: день, ночь, различная геомагнитная активность, разные широтные зоны. Произвести сопоставление полученных результатов с представленным в литературе набором признаков ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ), и проанализировать результаты этого сопоставления. Провести исследование зависимости характеристик ИПЗ от метода определения невозмущённого состояния.

2) Осуществить математическое моделирование отклика ПЭС ионосферы на воздействия электрических полей сейсмического происхождения с использованием глобальной трёхмерной нестационарной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM и произвести сопоставление модельных возмущений ПЭС с наблюдениями.

3) Выявить пространственные распределения сейсмогенного электрического потенциала и вертикальных токов (для ионосферных высот), требуемые для формирования наблюдавшихся областей возмущённого ПЭС, и сопоставить их

с реально существующими токами (и полями) в глобальной электрической цепи.

4) Дать физическую интерпретацию выявленных особенностей ПЭС ионосферы в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

Метод исследования. Исследования осуществлены 1) с привлечением статистических методов обработки данных наблюдений, в основном GPS ПЭС ионосферы; 2) методом физико-математического моделирования с использованием глобальной трёхмерной нестационарной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM. Модель UAM описывает термосферу, ионосферу, плазмосферу и магнитосферу путём совместного решения системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения, теплового баланса и уравнения для электрического потенциала, учитывает расхождение геомагнитной и географической осей Земли. Для задания сейсмических воздействий на ионосферу в уравнение для электрического потенциала дополнительно введены граничные условия, отражающие появление дополнительных сейсмогенных потенциалов на границах эпицентральной области. Результаты модельных расчётов сопоставлены с данными наземных и спутниковых измерений. Для проверки надёжности установленных характеристик ИПЗ относительные отклонения ПЭС ионосферы рассчитаны с использованием нескольких методов определения спокойного невозмущённого состояния.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена достоверностью и надёжностью определения ПЭС ионосферы по данным радиопросвечивания ионосферы сигналами систем глобального позиционирования и применяемых методик восстановления вертикального ПЭС; обоснованностью выявления аномалий на основе анализа этих данных; физической обоснованностью хорошо известных формулировок базовых законов сохранения (уравнений непрерывности, движения, теплового баланса) и уравнения для электрического потенциала, совместно решаемых в физико-математической модели верхней атмосферы Земли UAM; апробированностью модели UAM; согласием результатов расчётов автора с данными наблюдений параметров ионосферной плазмы, с модельными результатами других исследователей, и согласием полученных оценок величин сейсмогенных токов с наблюдающимися токами в глобальной электрической цепи.

Научная новизна диссертационной работы заключается в комплексном исследовании ИПЗ в ПЭС ионосферы на основе электромагнитного механизма их формирования (с учётом вытекающего из этого механизма требования магнитной сопряжённости) с использованием современной гидродинамической

модели верхней атмосферы Земли, в которую введены параметры и воздействия, связанные с процессами, протекающими в литосфере и имеющими сейсмическую природу.

В результате:

1) на основе анализа вариаций ПЭС ионосферы перед землетрясениями впервые выявлены эффекты положения терминатора и подсолнечной точки на ИПЗ. Показано, что когда ионосфера освещена (подсолнечная точка находится в околоэпицентральной секторе), относительные возмущения ПЭС ослабляются в околоэпицентральной и магнитосопряженной к ней областях.

2) Исследован электромагнитный механизм формирования ИПЗ в ПЭС ионосферы – дрейф ионосферной плазмы $F2$ -области в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях. Впервые с помощью модели УАМ показана его эффективность.

3) Впервые исследовано влияние пространственной локализации источников сейсмогенного возмущения и их амплитуд (на уровне ионосферы) на характеристики ионосферного отклика в ПЭС на сейсмогенные воздействия.

4) Получены оценки величин возмущений ионосферного электрического поля, требуемых для создания возмущений в ПЭС, аналогичных наблюдавшимся перед сильными землетрясениями.

5) Впервые получены оценки величин вертикального тока (на нижней границе ионосферы) сейсмического происхождения, требуемого для модельного воспроизведения сейсмогенных ПЭС-аномалий.

6) Впервые показано, что на основе электромагнитного механизма осуществления связи системы «литосфера-ионосфера» ($[E \times B]$ -дрейфа) могут быть объяснены морфологические особенности наблюдающихся перед сильными землетрясениями возмущений ПЭС ионосферы, рассматриваемых в качестве ИПЗ.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что полученные автором результаты могут быть использованы

1) для совершенствования многопараметрических методов прогноза сильных сейсмических событий; 2) при построении глобальных и региональных комплексных систем прогноза землетрясений, включающих поиск и выявление аномальных сейсмогенных возмущений ПЭС ионосферы в качестве одной из компонент; 3) для осуществления корректной физической интерпретации данных наблюдений; 4) для эпигноза и прогноза вариаций параметров верхней атмосферы в зависимости от параметров сейсмогенных источников и гелио-геофизических условий; 5) для тестирования результатов других исследований, привлекающих теоретические модели, в части адекватности воспроизведения ими структуры и динамики

ионосферных возмущений, а также параметров привлекаемых для этого «генераторов» сейсмической природы, в том числе вертикальных электрических токов.

На защиту выносятся:

1) Установленные закономерности пространственной структуры областей аномальных возмущений ПЭС ионосферы, трактуемых как ИПЗ, полученные на основе анализа данных наблюдений и результатов математического моделирования с использованием глобальной трёхмерной нестационарной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM.

2) Полученные на основе модельных расчётов оценки величины сейсмогенных возмущений ионосферных электрических полей и токов, а также их пространственные распределения.

3) Физическая интерпретация результатов модельных расчётов и данных наблюдений по возмущениям ПЭС ионосферы в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

Личный вклад автора. Автор участвовал в постановке задач, лично с помощью модели UAM выполнил расчёты по изучению отклика ионосферной плазмы на сейсмогенные воздействия, численно исследовал зависимость возмущений в ПЭС от пространственной локализации (конфигурации границы), амплитуд и режимов действия сейсмогенных источников. По результатам расчётов автором построены глобальные и региональные карты абсолютных и относительных возмущений ПЭС ионосферы, проведён их анализ и сопоставление с данными наблюдений и результатами других исследователей, дана физическая интерпретация полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении, написании и подготовке публикаций по теме диссертационного исследования.

Апробация работы и публикации. Основные результаты докладывались и обсуждались на IUGG XXIV General Assembly (2007, Perugia, Italy), International Workshop on Seismo-Electromagnetic Phenomena (2007, Bandung, Indonesia), Международных научно-технических конференциях «Наука и образование» (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, Мурманск), EGU General Assembly (2008, Vienna, Austria), XXIX General Assembly of URSI (2008, Chicago, USA), XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium (2011, Istanbul, Turkey), International Conference «Fundamental Space Research» (2008, Sunny Beach, Bulgaria), 31^{ом}, 32^{ом}, 33^{ем}, 34^{ом} и 35^{ом} ежегодных семинарах «Физика авроральных явлений» (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, Апатиты), 1^{ой}, 2^{ой}, 3^{ей} и 4^{ой} международных конференциях «Atmosphere, Ionosphere, Safety» (2008, 2010, 2012, 2014, Калининград), 7^{ой}, 8^{ой}, 9^{ой}

и 10^{ой} международных конференциях «Problems of Geocosmos» (2008, 2010, 2012, 2014, Санкт-Петербург), IAGA 11th Scientific Assembly (2009, Sopron, Hungary), 38th COSPAR Scientific Assembly (2010, Bremen, Germany), AGU Fall Meeting (2010, San-Francisco, CA, USA), 6^{ой} международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (2011, Апатиты), Школе молодых учёных «Высокоширотные геофизические исследования» (2011, Мурманск), International Workshop on Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes and Volcanoes (EMSEV-2012) (Gotemba, Japan, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 55 работ, из них 10 статей в журналах, включённых в перечень ВАК, 6 статей в иных научных журналах, 2 коллективные монографии, 17 работ в трудах и материалах научных конференций и 20 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения. Работа содержит 146 страниц текста, в том числе 53 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 228 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель работы, приведены сведения о методах исследования, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности и обоснованности полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены личный вклад автора, сведения об апробации результатов работы, публикациях, структуре и объёме диссертационной работы.

Глава первая носит обзорный характер. В п.1.1 Главы 1 на основе анализа публикаций представлены типичные возмущения в вариациях параметров ионосферной плазмы, интерпретируемые как предвестники сильных землетрясений: 1) возмущения компонент магнитного и электрического полей; 2) увеличение диффузности в *E* и *F*-слоях, формирование спорадических *E_s* слоёв над областью будущего землетрясения; 3) увеличение (уменьшение) критических частот, высоты максимума электронной концентрации и плотности на высотах максимума *F2*-слоя; 4) локальность возмущений – их привязка к околоэпицентральной и часто магнитосопряжённым областям; времена жизни — от нескольких часов до нескольких суток до землетрясения; 5) изменение ТТ (terminator time)-характеристик за несколько дней до основного сейсмического события.

В п.1.2 систематизированы и обобщены основные морфологические особенности вариаций ПЭС ионосферы, наблюдавшихся перед сильными землетрясениями, рассматриваемые в качестве ИПЗ:

1) аномальные сильные (> 30-90%) положительные или отрицательные модификации ПЭС перед $M_w \geq 5$ землетрясениями, привязанные к околоэпицентральной и часто магнитосопряжённой областям. Вопрос доминирования определённого знака сейсмогенной ПЭС-аномалии остаётся открытым. Согласно работам Захаренковой И.Е., положительные ПЭС-возмущения регистрируются чаще, чем отрицательные. В работах Liu J.Y. сообщается о доминировании пониженных значений ПЭС для землетрясений тайваньского региона.

2) Пространственные размеры ионосферных ПЭС-аномалий составляют > 1500 км вдоль меридиана и > 3500 км вдоль параллели. Форма и размер возмущённых областей в основном сохраняются в течение > 4 часов.

3) Формирование ПЭС-аномалий начинается от нескольких дней и часов до 1-2 недель до землетрясения. Развитие ИПЗ может сопровождаться сменой знака аномалии на противоположный. Непосредственно перед землетрясением или за несколько часов до него может происходить ослабление аномалии. Время жизни сейсмогенного отклонения одного знака составляет 4-6 часов и может превышать 12 часов в случаях очень сильных ($M_w \geq 8$) землетрясений.

4) Положение максимума ПЭС-аномалии не обязательно совпадает с положением эпицентра землетрясения, но находится в околоэпицентральной области, размеры которой, как указано в п. 2, превышают 1000 км вдоль геомагнитной параллели и меридиана.

5) В случае низкоширотных землетрясений наблюдаются эффекты в аномалии Эпплтона F_2 -области ионосферы: смещение её «гребней» вплоть до полного смыкания, заполнение или, в некоторых случаях, углубление экваториального провала между «гребнями» аномалии.

В п.1.3 автор анализирует возможные механизмы осуществления связей в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера». Рассматриваются два пути передачи в ионосферу сейсмогенных возмущений через нижележащую атмосферу: атмосферно-волновой (включая акустико-гравитационные (АГВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ)) и электромагнитный каналы.

Первый канал не объясняет обнаруженные в ПЭС эффекты: отсутствие перемещений аномалий (ВГВ характеризуются распространением от источника со скоростями ~500-700 м/с); отсутствие волновой структуры, наличие магнитной сопряжённости и обнаруженные автором эффекты ночного доминирования.

По этой причине автор рассматривает электромагнитный канал. В качестве физического механизма формирования ИПЗ в ПЭС рассматривается вертикальный вверх (вниз) перенос ионосферной плазмы $F2$ -слоя (доминирующий ион – O^+) под действием зонального сейсмогенного электрического поля $[E \times B]$ -дрейфом в области меньших (больших) концентраций N_2 и O_2 , низких (высоких) скоростей её потерь в ионно-молекулярных реакциях с нейтральным газом:



Вклад реакции (2) является определяющим, т.к. концентрация молекул $n(N_2)$ в максимуме $F2$ -слоя превосходит $n(O_2)$ более, чем на порядок [Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.].

Во **второй главе** автор исследует особенности вариаций ПЭС ионосферы для конкретных сильных землетрясений. В **п.2.1** рассматривается вопрос определения спокойных гелиогеофизических условий и фоновой вариации ПЭС ионосферы и индексы геомагнитной активности k_p , a_p , D_{st} , AE . В **п.2.2-п.2.10** автор анализирует ПЭС-возмущения перед конкретными землетрясениями (1) $M_w 6.8$, Китира, Южная Греция, 8 января 2006 г.; 2) $M_w 7.5$, Перу, 25 сентября 2005 г.; 3) $M_w 7.0$, Гаити, 12 января 2010 г.; 4) $M_w 7.0$, Аргентина 1 января 2011 г. и $M_w 7.1$, Чили, 2 января 2011 г.; 5) $M_w 9.0$, Япония, 11 марта 2011 г.; 6) $M_w 7.1$, Турция, 23 октября 2011 г.; 7) $M_w 7.4$, Курильские острова, 15 января 2009 г.; 8) $M_w 6.8$, Аргентина, 13 ноября 2006 г.; 9) $M_w 6.8$, Индонезия, 26 февраля 2005 г) для спокойных, умеренных и возмущённых гелиогеофизических условий, для случаев одиночных сейсмических событий и осложнённых «соседней» сейсмической активностью. В **п.2.11** исследуется зависимость полученных результатов от метода расчёта фоновой вариации. В **п.2.12** (Заключение к Главе 2) автор обобщает основные особенности возмущений ПЭС ионосферы, наблюдавшихся перед сильными землетрясениями, приводит новый (дополненный выявленными в **п.2.2-п.2.10** ионосферными эффектами) перечень ПЭС-аномалий, рассматриваемых в качестве ИПЗ. Показано, что все приведённые выше исследования частных случаев относительных отклонений ПЭС ионосферы от фоновой вариации, наблюдавшихся перед сильными сейсмическими событиями, обнаруживали следующие особенности: 1) Возмущения ПЭС проявлялись в виде локализованных положительных или отрицательных относительных отклонений от спокойного хода за 1-5 дней до землетрясения. 2) Аномалии существовали в околоэпикентральной и магнитосопряжённой к ней областях, время жизни составляло более 6 ч. Положение максимума ПЭС-возмущений не совпадало с вертикальной проекцией эпицентра землетрясения. 3) Доминирующие возмущения сопровождалось более слабыми возмущениями противоположного знака. 4) В большинстве случаев доминировали положительные аномалии ПЭС.

5) Величина возмущений составляла более 40%; пространственные размеры проявления предвестника при данном уровне – $> 15^\circ$ вдоль меридиана и $> 30^\circ$ вдоль параллели. б) Для низкоширотных землетрясений наблюдались эффекты модификации аномалии Эпплтона.

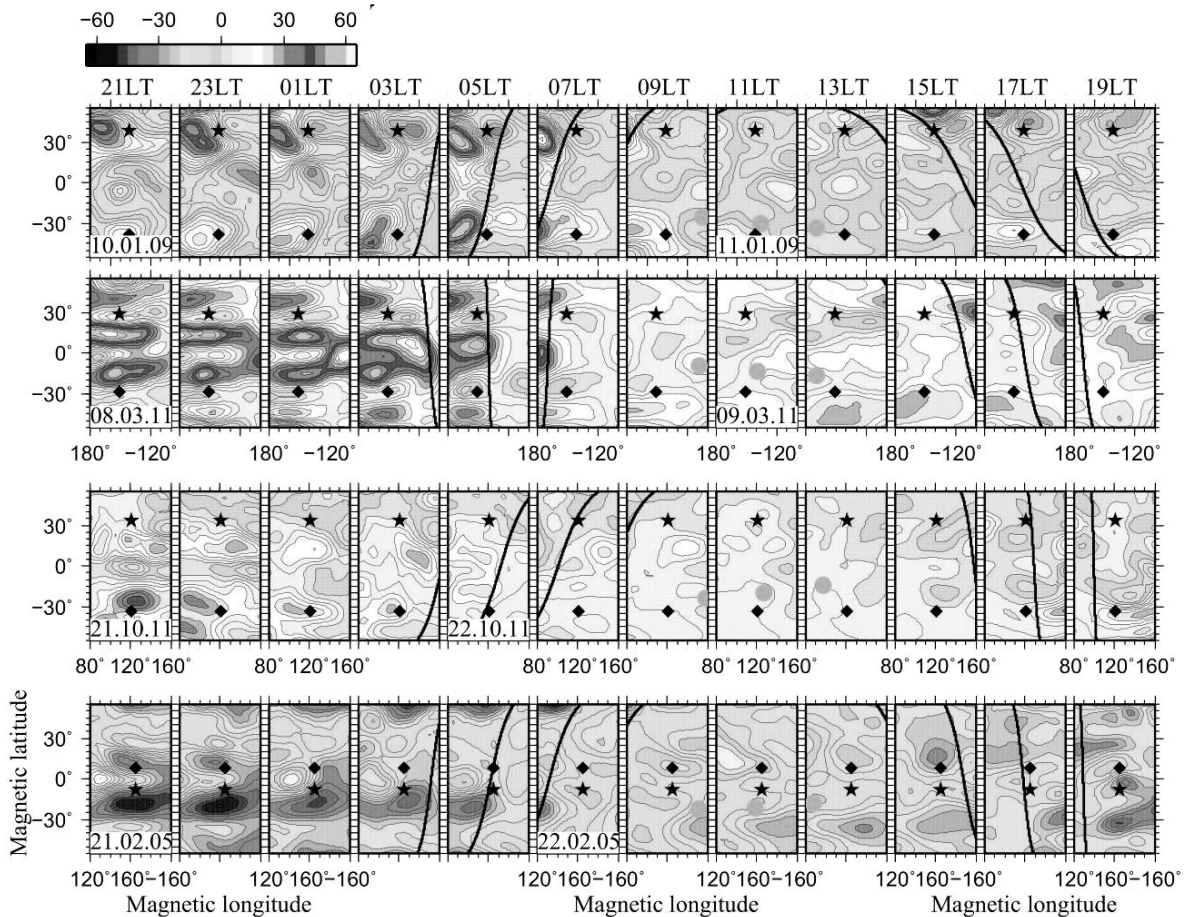


Рисунок 1. Относительные возмущения (%) ПЭС, наблюдавшиеся перед землетрясениями (сверху вниз): 1) M_w 7.4, 15 января 2009 г. 17:49 UT (16.01.2009, 03:49LT), Курильские о-ва; 2) M_w 9.0, 11 марта 2011 г. 05:46UT / 14:46 LT, Япония; 3) M_w 7.1, 23 октября 2011 г. 10:41UT / 13:41LT, Турция; 4) M_w 6.8, 26 февраля 2005 г 12:56UT/19:56LT, Индонезия.

Звезда – положение эпицентра. Ромб – магнитосопряженная точка. Серый круг – подсолнечная точка. Чёрная кривая – линия терминатора. Метки дат (в белых прямоугольниках) приведены по универсальному времени (UT). Все карты выровнены по местному времени.

Особенности (1)-(6) согласуются с приведённым ранее перечнем сейсмогенных ПЭС-аномалий ионосферы. Результаты автора позволили расширить этот перечень новыми признаками: 7) «запрещённым» окном для существования аномалий в околополуденные часы, выраженным в форме существенного ослабления относительных возмущений ПЭС ионосферы с приходом восходного

терминатора, в т.ч. вплоть до их полного уничтожения с приходом подсолнечной точки, т.е. с приходом освещённой Солнцем хорошо проводящей области ионосферы. 8) восстановление аномалий с уходом западного (закатного) терминатора.

Признаки (7)-(8) другими авторами не назывались и не являются единичными случаями. Их иллюстрация представлена на рисунке 1. Особенности (1)-(8) стабильно существовали при различных геофизических условиях: как в геомагнитно спокойной, так и возмущённой обстановке, для случаев как единичного, «изолированного» землетрясения, так и зашумлённых ближней сейсмической активностью, для различных сезонов, долготных и широтных секторов.

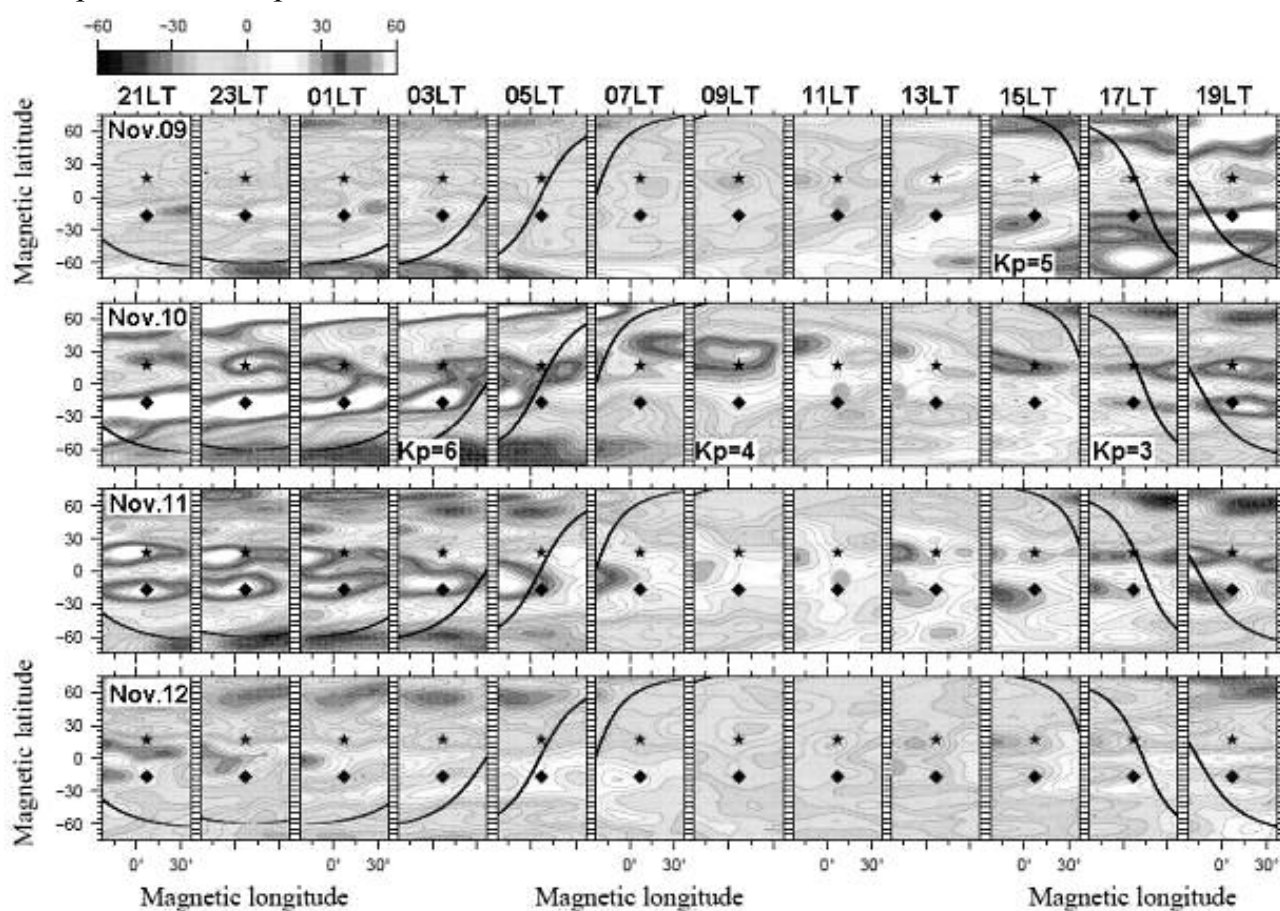


Рисунок 2. Относительные (%) возмущения ПЭС ионосферы, наблюдавшиеся в период 9-12 ноября 2006 г., 02UT - 24UT (слева направо) перед аргентинским землетрясением 13 ноября 2006 г., 01:26 UT. Над каждым столбцом отмечено местное время. Значения k_p -индекса приведены в белых прямоугольниках.

Установленные особенности вариаций ПЭС ионосферы не являются следствием изменения геомагнитной обстановки. Характерным для связанных с геомагнитной активностью возмущениями является то, что области

их зарождения размещаются в высоких широтах, а сами возмущения распространяются к средним и низким широтам со скоростью порядка 500-700 м/с, преимущественно вдоль магнитного меридиана.

Пример наложения возмущений от геомагнитной активности в присутствии сейсмогенных возмущений (%) ПЭС ионосферы представлен на рисунке 2 для $M_w 6.8$ землетрясения 13 ноября 2006 г, Аргентина. Из рисунка видно, что увеличение индекса k_p до 5 единиц в 17LT 9 ноября 2006 г. сопровождалось формированием интенсивных положительных возмущений, зародившихся на высоких широтах, которые распространялись по направлению к экватору. Увеличение индекса k_p до 6 единиц сопровождалось усилением положительных возмущений ПЭС в обоих полушариях, в южном полушарии также наблюдались обширные области отрицательных возмущений ПЭС. Уменьшение значений индекса k_p до 4 и впоследствии 3 единиц сопровождалось уменьшением величины ПЭС-возмущений и занимаемой ими площади и исчезновением перемещающихся (вдоль меридиана) возмущений.

Рисунок 2, на взгляд автора, наглядно демонстрирует различия между возмущениями ПЭС ионосферы от сейсмогенных и магнитосферных источников; последние при этом чётко различимы даже в присутствии первых.

Во всех рассмотренных автором случаях сейсмогенные вариации ПЭС ионосферы не обладали характеристиками возмущений, связанных с магнитной активностью, т.е. отсутствовали ВГВ и ПИВы.

В **третьей главе** представлены результаты исследований физического механизма формирования ИПЗ в ПЭС ионосферы – электромагнитного дрейфа плазмы $F2$ -области ионосферы в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях, – методом математического моделирования с использованием глобальной трёхмерной нестационарной модели верхней атмосферы Земли UAM. В **п.3.1-п.3.2** обсуждаются возможные механизмы формирования ИПЗ в ПЭС ионосферы и пути возникновения сейсмогенных возмущений ионосферных электрических полей. В **п.3.3** описана модель UAM и её модификация, применявшаяся для проведения численных экспериментов. Модель состоит из 4 блоков: 1) нейтральной атмосферы и нижней ионосферы; 2) $F2$ -области ионосферы и плазмосферы; 3) расчёта электрического поля; 4) магнитосферный блок.

В блоке $F2$ -области ионосферы и плазмосферы рассчитываются концентрации ионов атомарного кислорода $n(O^+)$ и водорода $n(H^+)$, ионная T_i и электронная T_e температуры, скорости ионов $V(O^+)$ и $V(H^+)$ для высот от 175 км до $15R_E$. Все заряженные компоненты верхней атмосферы полагаются полностью замагниченными на высотах более 175 км. В этом блоке решается следующая система уравнений [Namgaladze et al., 1988, doi: 10.1007/BF00879812]:

$$Dn_i/Dt + \nabla^{par}(n_i V_i^{par}) = Q_i - L_i - n_i \nabla^{per} V^{per}, \quad (3)$$

$$2 m_i n_i (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V}_i)^{par} = m_i n \mathbf{g}^{par} - \nabla^{par}(n_i k T_i) - (n_i/n_e) \nabla^{par}(n_e k T_e) - \quad (4)$$

$$- \sum_n \mu_{in} V_{in} n_i (V_i^{par} - V^{par}) - \sum_j \mu_{ij} V_{ij} n_i (V_i^{par} - V_j^{par}),$$

$$V_i^{per} = V_e^{per} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2, \quad (5)$$

$$V_e^{per} = \sum_i n_i V_i^{per} / n_e, \quad (6)$$

$$(3 n_i k / 2) (DT_i / Dt + V_i^{par} \nabla^{par} T_i) + (n_i k T_i) \nabla V_i^{par} - \nabla^{par}(K_i \nabla^{par} T_i) = \quad (7)$$

$$= P_{iQ}^J + P_{iT}^e + P_{iT}^j + P_{iT}^n,$$

$$(3 n_e k / 2) (DT_e / Dt + V_e^{par} \nabla^{par} T_e) + (n_e k T_e) \nabla V_e^{par} - \nabla^{par}(K_e \nabla^{par} T_e) = \quad (8)$$

$$= P_{eQ}^p + P_{eQ}^c + P_{eT}^i + P_{eT}^j + P_{eT}^n.$$

Индексы i , j и e обозначают атомарные ионы O^+ и H^+ и электроны, соответственно. Символы par и per - направления, параллельные и перпендикулярные геомагнитному полю. $D/Dt = \partial/\partial t + (\mathbf{V}_{per}, \nabla)$ - производная Лагранжа вдоль дрейфовой траектории, определяемой из уравнения (6). Q_i , L_i - скорости рождений и потерь атомарных ионов O^+ и H^+ ; \mathbf{g}^{par} - проекция на геомагнитную силовую линию суммы гравитационного и центробежного ускорений; P_{iQ}^J - Джоулев нагрев ионного газа; P_{iT}^e , P_{iT}^j , P_{iT}^n - скорости теплообмена между ионами; P_{eQ}^p , P_{eQ}^c - скорости локального и нелокального нагрева электронного газа фотоэлектронами и высыпаящимися магнитосферными электронами; P_{eT}^i , P_{eT}^j , P_{eT}^n - скорости теплообмена между электронами.

Более подробное описание уравнений (3)-(8) модели представлено в работе [Namgaladze et al., 1988, doi: 10.1007/BF00879812] и монографии [Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.].

Блок расчёта электрического поля решает уравнение для потенциала φ электрического поля $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$ численно с учётом динамо-действия термосферных ветров:

$$\nabla[\hat{\sigma}(\nabla\varphi - \mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \mathbf{j}_m] = 0, \quad (9)$$

где $\hat{\sigma}$ - тензор проводимости ионосферы, рассчитываемой с использованием концентраций нейтральных и заряженных частиц из блока нейтральной атмосферы и нижней ионосферы; \mathbf{j}_m - плотность тока магнитосферного происхождения. Для учёта воздействий на ионосферу сейсмогенными токами уравнение (9) приведено к виду (10)

$$\nabla[\hat{\sigma}(\nabla\varphi - \mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \mathbf{j}_m - \mathbf{j}_s] = 0, \quad (10)$$

где \mathbf{j}_s - вертикальный сейсмогенный электрический ток, заданный на нижней границе.

В п.3.4-3.5 представлены результаты моделирования сейсмогенных воздействий на ионосферу. При помощи глобальной трёхмерной нестационарной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM проведены численные эксперименты: 1) путём «фиксации» дополнительного сейсмогенного электрического потенциала; 2) путём задания вертикального сейсмогенного электрического тока на нижней границе ионосферы. На основе анализа результатов моделирования сделан вывод, что указанный механизм может приводить к наблюдаемым возмущениям в ПЭС ионосферы, и были получены следующие оценки.

С помощью метода «фиксации» дополнительного сейсмогенного потенциала показано:

1) Для генерации возмущений ПЭС, аналогичных наблюдавшимся перед сильными землетрясениями, на ионосферных высотах требуются зональное поле амплитудой 4-10 мВ/м на средних широтах и 2-4 мВ/м на низких и экваториальных широтах. Указанные величины больше типичных спокойных значений (1 и 0.2 мВ/м соответственно), но значительно меньше высокоширотных электрических полей магнитосферного происхождения (15-25 мВ/м) для тех же спокойных условий. Полученные оценки величины сейсмогенного электрического поля согласуются с данными спутниковых наблюдений INTERCOSMOS-BULGARIA-1300, DEMETER, оценками по данным ионозондов, не превышают значений электрических полей высокой интенсивности в *E*-слое ионосферы по данным ракетных измерений.

2) Зависимость эффектов в ПЭС ионосферы от типа («дипольного» или «монопольного») конфигурации размещения источника дополнительного электрического потенциала на низких широтах слабая. Источники как дипольного, так и монопольного типа генерируют сходные по структуре возмущения, но амплитуда возмущений от источников дипольного типа больше.

3) Зависимость эффектов в ПЭС ионосферы от типа («дипольного» или «монопольного») и конфигурации пространственного размещения источника на средних широтах: источники монопольного типа воспроизводят возмущения в ПЭС хуже, чем дипольные.

4) Полученные распределения вариаций относительных возмущений ПЭС ионосферы от этих полей согласуются как со средней картиной, так и для случаев конкретных сильных сейсмических событий.

С помощью метода задания вертикального электрического тока в качестве нижнего граничного условия для уравнения электрического потенциала получены следующие оценки:

1) Ток плотностью 10^{-6} А/м² (точечный источник) порождает возмущения

ПЭС ионосферы, существенно превосходящие наблюдающиеся перед сильными землетрясениями, и приводит к физически неоправданным скоростям вертикального дрейфа. Точечный источник величиной 10^{-9}А/м^2 приводит к формированию слабых по величине возмущений ПЭС ионосферы. Численные эксперименты для землетрясения 12 января 2010 г. (Гаити) показали, что для воспроизведения наблюдавшихся в ПЭС ионосферы эффектов требуется линейно распределённый источник амплитудой 20 нА/м^2 .

2) Токи на низких и экваториальных широтах приводят к возникновению меньших по величине электрических полей и возмущений ПЭС, чем в случае таких же источников на средних широтах. Такая особенность связана с изменением угла наклона силовых линий геомагнитного поля относительно поверхности Земли по мере «движения» от полюса в направлении экватора.

3) Модельные эксперименты воспроизводят обнаруженные автором эффекты ночного доминирования аномалий и их ослабления с приходом восходного терминатора и подсолнечной точки.

Таким образом, методом математического моделирования выполнена проверка эффективности электромагнитного механизма формирования ИПЗ в ПЭС ионосферы – электромагнитного дрейфа плазмы $F2$ -области ионосферы в скрещенных электрическом (\mathbf{E}) и магнитном (\mathbf{B}) полях. Показано, что указанный механизм способен породить возмущения ПЭС ионосферы, согласующиеся с наблюдавшимися перед сильными землетрясениями.

С учётом того, что использованная в модельных расчётах величина плотности тока ($\sim 10^{-8}\text{А/м}^2$) на 4 порядка превосходит так называемый ток «хорошей погоды», требуемое возмущение концентрации зарядов можно оценить как $n_d \sim 10^4 n_Q$, где n_d соответствует сейсмовозмущённым значениям, n_Q - концентрация зарядов в спокойных условиях. Для такого увеличения количества зарядов требуется появление источника ионизации в зоне разломов или уменьшение скорости рекомбинации заряженной компоненты (ион-электронной и ион-ионной рекомбинации). Оба фактора в условиях подготовки сильных землетрясений могут действовать совместно.

Очевидно, что такие интенсивные токи не могут существовать долго ($> 2\text{-}4$ суток), соответствуют экстремальным ситуациям подготовки сильных землетрясений, сопровождающимся появлением вблизи тектонических разломов мощных источников ионизации (радон, «положительные дыры») и большими возмущениями ПЭС. Их выявление затруднено отсутствием достаточно густой сети регулярных измерений именно вертикальных токов, а не электрических (требующих знания проводимости) или магнитных (зашумлённых полями от ионосферных и магнитосферных токов) полей. Но их существование косвенно

подтверждается наблюдениями вблизи эпицентров готовящихся землетрясений стабильных магнитосопряжённых возмущений ПЭС, не перемещающихся вдоль меридиана, и соответствующими модельными расчётами.

Предложенный механизм осуществления литосферно-ионосферной связи позволяет объяснить все представленные в пп. (1)-(8) особенности предсейсмических вариаций ПЭС ионосферы:

Магнитная сопряжённость сейсмо-ионосферных эффектов: электрические поля, если появляются в одном из полушарий, распространяются в противоположное полушарие вследствие эквипотенциальности силовых линий геомагнитного поля, что приводит к одному и тому же электрическому потенциалу и электрическим полям в обоих полушариях; эффекты такого поля не обязаны быть одинаковыми и могут отличаться из-за различий в нейтральном составе.

Эффект терминатора и подсолнечной точки: электрические поля определяются локальной проводимостью. Приход освещённой Солнцем области ионосферы соответствует приходу области повышенной ионизации и повышенной проводимости, что должно приводить к ослаблению электрического поля вплоть до его полного исчезновения. Снятие поля приводит к исчезновению аномалий, возможно, с задержкой вследствие инертности ионосферы.

Модификация экваториальной ионизационной аномалии (Эплтона): аномалия Эплтона определяется электрическими полями; появление дополнительного сейсмогенного электрического поля должно приводить к её модификации как единой структуры (двух максимумов по обе стороны и провала над геомагнитным экватором совместно).

Локализация ПЭС-аномалии соответствует расположению источника сейсмогенного вертикального электрического тока, текущего над разломами между Землёй и ионосферой в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

Время жизни сейсмо-ионосферной ПЭС-аномалии соответствует времени жизни сейсмогенного вертикального электрического тока. Может быть объяснено, если процесс подготовки сейсмического события, занимает достаточно длительный период времени.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1) На основе анализа вариаций ПЭС ионосферы в периоды, предшествующие сильным сейсмическим событиям, на примере ряда сильных землетрясений в условиях различной геофизической активности, сезонов, долготных и широтных секторов показано: сейсмо-ионосферные предвестники

в ПЭС проявляются в виде i) крупномасштабных (> 1000 км) долгоживущих ($> 4-6$ ч) неоднородностей, локализованных в околоэпицентральной и магнитосопряжённой к ней областях. ii) Относительные возмущения ПЭС реагируют на изменение условий освещённости: ослабляются вплоть до полного уничтожения с приходом утреннего (восходного) терминатора и подсолнечной точки и восстанавливаются после ухода вечернего (заходного) терминатора. Указанные эффекты положения терминатора и подсолнечной точки выявлены впервые и ранее другими авторами не сообщались.

2) Изучен физический механизм формирования ПЭС-аномалий – дрейф ионосферной плазмы $F2$ -области в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях – и механизм осуществления связи системы «литосфера-атмосфера-ионосфера» на основе вертикального электрического тока сейсмического происхождения.

3) Впервые с использованием глобальной трёхмерной нестационарной модели верхней атмосферы Земли UAM методом физико-математического моделирования i) проверена эффективность предложенного механизма электромагнитного $[E \times B]$ дрейфа и принципиальная возможность генерации с его помощью возмущений ПЭС ионосферы, аналогичных наблюдавшимся перед сильными землетрясениями. ii) Предложены конфигурации пространственных распределений требуемых сейсмогенных электрических потенциалов (электрических зарядов), необходимых для генерации наблюдавшихся возмущений ПЭС ионосферы. Исследована зависимость возмущений от типа дополнительного вносимого источника (монопольного – состоящего из зарядов одного знака; дипольного – состоящего из зарядов разных знаков на границах возмущённой области). iii) Получены численные оценки требуемых для создания эффектов в ПЭС, аналогичных наблюдавшимся, возмущений зональной компоненты ионосферного электрического поля E : 2-4 мВ/м для низких широт и 4-10 мВ/м для средних. iv) Получены оценки величины плотности сейсмогенного электрического тока, требуемого для генерации таких полей и соответствующих им эффектов в ПЭС ионосферы: на средних широтах требуется ток $\sim 10^{-8}$ А/м² на площадке размерами ~ 200 км \times ~ 2000 км.

4) Впервые показано, что на основе предложенного механизма осуществления связи системы «литосфера-ионосфера» могут быть объяснены все наблюдаемые особенности в предсейсмических вариациях ПЭС ионосферы.

Исследования по теме диссертационной работы и представление полученных результатов на международных научных конференциях было поддержано Российским Фондом Фундаментальных Исследований в рамках грантов №№ 08-05-98830-а, 08-05-09231-моб_з.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(в обратном хронологическом порядке)

в журналах, включённых в Перечень ВАК:

- 1) **О.В. Золотов**, А.А. Намгаладзе, Б.Е. Прохоров. Особенности вариаций полного электронного содержания ионосферы в периоды подготовки землетрясений 11 марта 2011 г. (Япония) и 23 октября 2011 г. (Турция) // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 20-26.
- 2) А.А. Намгаладзе, **О.В. Золотов**, Б.Е. Прохоров. Численное моделирование вариаций полного электронного содержания ионосферы, наблюдавшихся перед землетрясением 12 января 2010 г. на о-ве Гаити // Геомагнетизм и Аэрномия. 2013. Т. 53. № 4. С. 553–560.
- 3) М.И. Карпов, А.А. Намгаладзе, **О.В. Золотов**. Моделирование возмущений полного электронного содержания ионосферы, создаваемых электрическими токами между Землей и ионосферой // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 14-19.
- 4) **О.В. Золотов**, А.А. Намгаладзе, И.Е. Захаренкова, О.В. Мартыненко, И.И. Шагимуратов. Физическая интерпретация и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений: средние широты // Геомагнетизм и Аэрномия. 2012. Т. 52. № 3. С. 413-420.
- 5) **O.V. Zolotov**, A.A. Namgaladze, B.E. Prokhorov. Total electron content disturbances prior to Great Tohoku March 11, 2011 and October 23, 2011 Turkey Van earthquakes and their physical interpretation // Proc. MSTU. 2012. V. 15. N. 3. P. 583-594.
- 6) M.I. Karpov, A.A. Namgaladze, **O.V. Zolotov**. Three-dimensional structure of the seismo-electromagnetic ionospheric electron density disturbances // Proc. MSTU. 2012. V. 15. N. 3. P. 595-603.
- 7) M.I. Karpov, **O.V. Zolotov**, A.A. Namgaladze. Modeling of the ionosphere response on the earthquake preparation // Proc. MSTU. 2012. V. 15. N. 2. P. 471-476.
- 8) Yu.V. Romanovskaya, A.A. Namgaladze, **O.V. Zolotov**, N.A. Starikova, V.Z. Lopatiy. Searching for seismo-ionospheric earthquakes precursors: Total Electron Content disturbances before 2005-2006 seismic events // Proc. MSTU. 2012. V. 15. N. 2. P. 477-481.
- 9) **О.В. Золотов**, Б.Е. Прохоров, А.А. Намгаладзе, О.В. Мартыненко. Вариации полного электронного содержания ионосферы в период подготовки землетрясений // Химическая физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 84-87.
- 10) **О.В. Золотов**, Б.Е. Прохоров. Морфологические характеристики вариаций полного электронного содержания ионосферы в период подготовки Вэнчуаньского землетрясения 2008 года // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4/2. С. 1078-1081.

Выходные сведения