

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения
Российской академии наук



На правах рукописи
УДК 550.388.2

Перевалова Наталья Петровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТОДОМ
ТРАНСИОНОСФЕРНОГО
GPS-ЗОНДИРОВАНИЯ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Иркутск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Куницын Вячеслав Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», заведующий кафедрой.

Стеблов Григорий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор,

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, главный научный сотрудник;

2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, заведующий сектором.

Тинин Михаил Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет», профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Защита состоится «11» июня 2014 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 12б, а/я 291, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Автореферат разослан «_____» 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,



Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Неослабевающий уже несколько десятилетий интерес к проблеме изучения ионосферных возмущений обусловлен тем, что эти исследования являются не только серьезной научной задачей, но имеют и важные прикладные аспекты. Возмущения (неоднородности) проявляются в вариациях различных параметров среды: электронной концентрации (N_e), полного электронного содержания (ПЭС), температуры ионов и электронов (T_i , T_e) и др. Ионосферные возмущения являются одной из составляющих частей комплекса космической погоды в околоземном космическом пространстве (ОКП), оказывая существенное влияние на функционирование современных технологических систем связи, навигации, локации, энергетики, космической техники. Практическое использование ОКП требует новых знаний о динамическом режиме неоднородной ионосферы. При этом необходимо учитывать глобальную протяженность ионосферы, ее регулярную и случайную изменчивость, взаимодействие с атмосферными слоями, магнитосферой, солнечным ветром.

В настоящее время достаточно хорошо исследована крупномасштабная структура ионосферы: глобальное распределение ионизации, ее суточные, сезонные и климатические вариации. В целом понятны механизмы образования ионосферы. Накоплен довольно большой материал по морфологии возмущений электронной концентрации. Хорошо исследованы эффекты влияния однородной и регулярно-неоднородной (фоновой) ионизованной среды на распространение радиоволн.

Значительно в меньшей степени изучены вопросы литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия, хотя совершенно ясно, что именно процессы взаимодействия приводят к возникновению ионосферных возмущений. Серьезной проблемой остается задача определения параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Требуют углубленного анализа физические механизмы образования, переноса, разрушения неоднородностей электронной концентрации. Постоянно возникают трудности с идентификацией источников возмущений в конкретных случаях. Остается актуальным вопрос о глобальном непрерывном контроле за состоянием верхней атмосферы. Очень ограничены возможности прогноза ионосферных возмущений. Решение данных задач входит в проблематику крупных современных международных программ (International Living with a Star Program, Climate and Weather of the Sun-Earth System, Lower Thermosphere Coupling Study, Magnetosphere-Ionosphere Coupling Storm/Substorm Effects Mid&Low Latitude, Global Change, CEDAR), исследования по которым координируются крупнейшими научными организациями (SCOSTEP, COSPAR, URSI, AGU, EGU и др.). Для организации оперативной диагностики и прогноза условий в ОКП в ряде стран (Россия, США, Япония, Евросоюз, Китай) разработаны национальные программы космической погоды.

Большинство наших знаний о структуре и динамике ионосферы получены с помощью ставших уже классическими радиофизических методов зондирования (ионозонды, радары некогерентного рассеяния, регистрация сигналов космических радиоисточников и т. д.). Эти методы успешно применяются и сегодня. Однако решение вопросов, связанных с детальной диагностикой и прогнозом ионосферных возмущений, выдвигает новые, более высокие требования к техническим характеристикам зондирующих систем, а также к качеству получаемой информации. Согласно известным в настоящее время пространственно-временным характеристикам ионосферных возмущений, для хорошего отображения этих возмущений средства детектирования должны обладать временным разрешением не хуже 10–100 с и пространственным разрешением не хуже 10–100 км. Не менее важной является необходимость одновременных и однотипных измерений. Детектирование воздействий, представляющих наибольший интерес (например, техногенных), требует, чтобы система мониторинга работала в непрерывном режиме.

Мировой научно-технический прогресс предоставляет мощные современные технологии и средства (глобальные спутниковые радиотехнические системы, информационные системы и т. п.), открывающие широкие перспективы для научных изысканий. Исследования ионосферы подошли сейчас к такой стадии, когда возникла необходимость и появилась возможность формирования глобальной системы геофизического мониторинга. Примерами организации подобного типа систем являются метеорологическая сеть, сейсмическая служба, служба обнаружения ядерных испытаний. Прообразом глобальной системы мониторинга ионосферы может служить мировая сеть ионосферных станций вертикального зондирования. Созданная в 50-х гг. прошлого столетия, она проводила согласованные измерения приблизительно в 150 точках земного шара и впервые продемонстрировала возможности системного подхода при изучении крупномасштабной структуры ионизации.

Новым мощным инструментом дистанционной диагностики ионосферы стали глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС с созданными на их основе широко разветвленными сетями приемников (более 3000 приемников по состоянию на декабрь 2013 г.). В каждый момент времени в зоне радиовидимости приемника находится не менее 10–15 навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС. Таким образом, тысячи лучей «приемник–спутник» одновременно просвечивают ионосферу. Чувствительность двухчастотных фазовых измерений в системах GPS, ГЛОНАСС позволяет детектировать неоднородности с амплитудой 0.01–0.001 % от суточного изменения ПЭС. Регистрация сигналов спутников на разнесенных приемниках дает возможность определять пространственные параметры неоднородностей и характеристики их движения. Таким образом, использование международной и региональных наземных сетей двухчастотных приемников навигационных систем GPS, ГЛОНАСС в практике ионосферных исследований впервые обеспечивает возможность организации глобального, непрерывного, полностью компьютеризированного мониторинга ионосферных возмущений с высоким временным и пространственным разрешением.

Вышеизложенные факторы определяют актуальность развития методов дистанционного зондирования ОКП, основанных на использовании навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, и проведения на их основе изучения динамики ионосферной плазмы, выполненных в диссертации. Активная разработка технологий дистанционного зондирования ионосферы с использованием сигналов GPS начата в конце 80-х гг. и ведется в нескольких направлениях: разработка технологии построения глобальных карт ПЭС (GIM); развитие методов GPS-радиотомографии ионосферы; разработка ассилияционных моделей для оперативного прогноза параметров ионосферы; разработка методов детектирования ионосферных возмущений. Значительный вклад в решение последней проблемы внесен исследовательской группой ИСЗФ СО РАН при активном участии автора. Разработка технологий дистанционного мониторинга ионосферы с помощью сигналов GPS/ГЛОНАСС и изучение с их помощью динамики ионосферных возмущений различного происхождения составляют предмет настоящей диссертации.

Цель и основные задачи диссертационной работы

Целью работы является исследование возмущений ионосферной плазмы, обусловленных влиянием магнитосферы, нейтральной атмосферы, литосферы, на основе разработанных методов дистанционного зондирования ионосферных возмущений по данным двухчастотных приемников навигационных систем GPS, ГЛОНАСС.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Разработка научных принципов исследования ионосферных неоднородностей с использованием трансионосферных сигналов GPS, ГЛОНАСС.
2. Оценка характеристик наземных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для регистрации и мониторинга возмущений ионосферной плазмы.
3. Разработка проекта региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири.
4. Разработка методов и синтез алгоритмов обработки данных многоканальных двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС.
5. Разработка методов и синтез алгоритмов для получения характеристик движения перемещающихся ионосферных возмущений по данным разнесенного приема сигналов GPS/ГЛОНАСС (технологии GPS-интерферометрии).
6. Разработка методики тестирования алгоритмов GPS-зондирования ионосферы, основанной на моделировании измерений полного электронного содержания (ПЭС).
7. Изучение пространственно-временных и динамических характеристик крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМ ПИВ), которые образуются в период геомагнитных бурь в авроральной зоне.
8. Исследование отклика ионосферы на тропические циклоны.
9. Исследование реакции ионосферы на землетрясения различной интенсивности.

Научная новизна работы

1. Разработан проект региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири и начато ее развертывание. Впервые проведена оценка характеристик (чувствительность, пространственное и временное разрешение, объем получаемой информации, диапазон измерений) наземных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для регистрации и мониторинга возмущений ионосферной плазмы.

2. Разработана специальная методика тестирования алгоритмов GPS-зондирования ионосферы, основанная на моделировании измерений ПЭС и позволяющая проверять достоверность расчетов характеристик ионосферных возмущений, а также решать задачи, связанные с анализом и интерпретацией результатов наблюдений.

3. С помощью разработанных в диссертации технологий глобального GPS-зондирования ионосферных возмущений впервые одновременно для всего долготного интервала Северного полушария экспериментально показано, что после внезапного начала магнитной бури в авроральной зоне можно выделить два типа возмущений ПЭС: 1) квазихаотические флуктуации ПЭС внутри южной границы аврорального овала; 2) крупномасштабные волны с периодами 40–60 мин, которые генерируются на всем протяжении южной границы аврорального овала и распространяются в направлении экватора до широт 40–30°.

4. Впервые на основе моделирования показано, что на интерпретацию результатов наблюдений отклонения распространения крупномасштабных волн, вызванных магнитной бурей, от экваториального направления может влиять методика расчетов: если КМ ПИВ, возникшее на границе аврорального овала, распространяется радиально от источника, то его скорость, рассчитанная в географической системе координат, будет иметь как меридиональную, так и зональную составляющие.

5. Для исследования влияния тропических циклонов (ТЦ) на ионосферу предложен метод сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС и карт приземных метеорологических параметров, построенных по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. Показана перспективность данного метода при исследовании реакции ионосферы на тропосферные воздействия. Совместный анализ карт возмущений ПЭС и метеопараметров обеспечивает возможность идентификации ионосферных возмущений, обусловленных воздействием ТЦ.

6. По данным зондирования ионосферы сигналами GPS и ионозондов с привлечением метеорологических и геомагнитных данных исследованы вариации ионосферных параметров во время тропических циклонов, действовавших в августе–ноябре 2005 г. вблизи Атлантического побережья США и в северо-западной части Тихого океана. Впервые показано, что на амплитуду ионосферного отклика на ТЦ оказывают влияние мощность циклона, характер высотного распределения метеорологических параметров (температура, давление, скорость ветра) над зоной действия ТЦ, а также другие ТЦ, действующие в регионе.

7. Впервые выполнен сравнительный анализ отклика ионосферы на землетрясения различной интенсивности ($4.1 \leq M_w \leq 9.0$). Проведено исследование поведения ионосферы во время наиболее крупных землетрясений, зарегистрированных в Байкальском регионе в 1999–2012 гг. Установлено существование порогового значения магнитуды $M_w \approx 6.5$, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС в ионосфере, вызванных землетрясением, не наблюдается.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные в диссертации технологии, методы, алгоритмы могут быть найти применение при формировании новых систем и аппаратно-программных комплексов, предназначенных для мониторинга состояния ионосферы с высокими пространственно-временным разрешением и чувствительностью. Они могут найти широкое применение как в научных исследованиях для углубления фундаментальных знаний о физике процессов верхней атмосферы и механизмах взаимодействия в системе «литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера», так и при решении прикладных задач, в том числе для регистрации и локализации искусственных воздействий на атмосферу Земли.

Методология и методы исследования

Исследования, выполненные в диссертации, проведены на основе анализа данных дистанционного зондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС. Для исследований использовались методы получения информации о ПЭС в ионосфере по данным измерений двухчастотных приемников GPS, ГЛОНАСС; методы расчета параметров движения ионосферных возмущений на основе разнесенного приема сигналов GPS/ГЛОНАСС; статистические методы обработки и анализа полученных экспериментальных данных; методы моделирования измерений ПЭС.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования динамики возмущений ПЭС после внезапного начала магнитной бури, позволившие выявить два типа возмущений ПЭС, возникающих в авроральной зоне, а также определить характеристики крупномасштабных волновых возмущений ПЭС, вызванных магнитной бурей.

2. Результаты исследований отклика ионосферы на тропические циклоны на основе сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС с картами приземных метеорологических параметров, позволившие установить, что над траекторией тропического циклона существует область неоднородностей ионосферной плазмы, которая формируется, когда циклон достигает стадии урагана, а на амплитуду ионосферного отклика на тропический циклон оказывает влияние характер высотного распределения метеорологических параметров над зоной действия циклона.

3. Результаты сравнительного анализа отклика ионосферы на землетрясения различной интенсивности, позволившие установить существование порогового значения магнитуды $Mw \approx 6.5$, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС в ионосфере, вызванных землетрясением, не наблюдается.

4. Результаты исследования эффектов землетрясения в Японии 11 марта 2011 г., позволившие с помощью методов GPS-интерферометрии получить карты скоростей перемещения возмущений ПЭС.

5. Разработанные принципы и методы дистанционного GPS-зондирования неоднородностей ионосферной плазмы, позволившие определить характеристики и начать создание региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обусловлена значительной статистикой наблюдений; применением для анализа экспериментальных данных обоснованных методов и проверкой с помощью численного моделирования; адекватностью полученных в работе результатов, а также их качественным и количественным согласием с результатами теоретических исследований, выполненных ранее другими авторами, и опубликованными экспериментальными данными.

Апробация результатов работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались: на Международном симпозиуме URSI Beacon Satellite Symposium 1997 (BSS-97), Венгрия, 1997; Международной научно-технической конференции, Красноярск, 1997; 32-й (Япония, 1998), 36-й (Китай, 2006), 38-й (Германия, 2010), 39-й (Индия, 2012) научных ассамблеях COSPAR; Международном симпозиуме по GPS (GPS-99), Япония, 1999; XXVI Генеральной ассамблее URSI, Канада, 1999; Международном симпозиуме Beacon Satellite Symposium (BSS-2001), Бостон, 2001; XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, 2002; Байкальских научных молодежных школах по фундаментальной физике БШФФ-2002, БШФФ-2009, БШФФ-2011, БШФФ-2013, Иркутск; XIII, XIV, XV, XVIII, XIX Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2006, 2007, 2008, 2012, 2013; 30-м и 33-м Ежегодных семинарах «Физика авроральный явлений», Апатиты, 2007, 2010; 5-й, 6-й, 7-й, 8-й, 9-й, 10-й Открытых Всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012; Восьмой Российско-Китайской рабочей группе по космической погоде, Китай, 2007; Международных симпозиумах стран СНГ по атмосферной радиации и динамике МСАРД-2009, МСАРД-2011, Санкт-Петербург; Всероссийской конференции «Солнечно-земная физика», посвященной 50-летию создания ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2010; семинарах ИСЗФ СО РАН.

Реализация результатов работы. Разработанные технологии глобального дистанционного мониторинга ионосферных возмущений на основе данных навигационной системы GPS использованы при выполнении ряда работ в соответствии с планами госбюджетных научно-исследовательских тем, проводимых в ИСЗФ СО РАН в течение 1997–2013 гг. Результаты проведенных исследований представлены в отчетах по научно-исследовательским госбюджетным темам. Некоторые результаты включены в перечень важнейших научных достижений, полученных по этим темам. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении проектов (грантов) РФФИ и гранта государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-272.2003.5. Программный комплекс GLOBDET внедрен в ИКФИА СО РАН (Якутск), ИКИР ДВО РАН (Паратунка), ИЗМИРАН (Москва). С помощью технологий GPS-зондирования и GPS-интерферометрии проведены исследования, результаты которых вошли в кандидатские диссертации сотрудников ИСЗФ СО РАН, ИВВАИУ МО, ИКИР ДВО РАН (Паламарчука К.С., Леонович Л.А., Лесюты О.С., Астафьевой Э.И., Войковой С.В., Ишина А.Б., Плотникова А.В., Живетьева И.В.).

Личный вклад автора. Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор принимала активное участие в постановке задачи и разработке научных принципов исследования ионосферных неоднородностей с использованием трансионосферных сигналов GPS, ГЛОНАСС. Выполнила оценку характеристик наземных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для регистрации и мониторинга возмущений ионосферной плазмы. Руководила разработкой проекта региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири. Выполнила разработку большого количества алгоритмов и программ, связанных с численной обработкой результатов GPS-измерений. Разработала специальную методику тестирования алгоритмов GPS-зондирования ионосферы, основанную на моделировании измерений полного электронного содержания, и принимала активное участие в проверке достоверности расчетов характеристик ионосферных возмущений. Провела серию исследований по изучению характеристик крупномасштабных ионосферных возмущений, генерируемых геомагнитными буяями. Разработала методику сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС и карт приземных метеорологических параметров и провела на ее основе изучение реакции ионосферы на ряд мощных тропических циклонов. Выполнила сравнительный анализ отклика ионосферы на землетрясения различной интенсивности, в том числе на наиболее крупные землетрясения, зарегистрированные в Байкальском регионе в 1999–2012 гг. Выполнила обобщение работ по дистанционному мониторингу ионосферных возмущений в монографии: Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Кроме того, автор принимала непосредственное участие в постановке задач, создании и проведении нескольких циклов измерений в 1997–2000 гг. на иркутском GPS-интерферометре, послужившем прообразом глобального GPS-детектора ионосферных возмущений; в проведении серии исследований по изучению реакции ионосферы на солнечные затмения, взрывы, запуски космических аппаратов; в выполнении координированных исследований ИСЗФ СО РАН, ИЗК СО РАН, ИФМ СО РАН в рамках междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН «Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне» (2009–2011 гг.) и «Литосферно-ионосферные взаимодействия в Байкальской рифтовой системе» (2012–2014 гг.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 95 печатных работах в отечественных и зарубежных изданиях (в том числе 13 – в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций; 16 – в журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования и рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций; 3 – в монографиях; 63 – в прочих научных изданиях).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Она содержит 286 страниц текста, 89 рисунков, 29 таблиц и список цитируемой литературы из 243 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертации. Обоснована актуальность рассматриваемого круга задач; изложены цели работы, теоретическая и практическая значимость выполненных исследований; сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое содержание работы.

Глава 1 содержит обзор полученных к настоящему времени сведений об ионосферных возмущениях, классических методов их детектирования, а также описание технологий дистанционной диагностики ионосферы, основанных на использовании глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

В разделе 1.1 описаны основные параметры ионосферных возмущений, которые проявляются в вариациях электронной концентрации N_e и полного электронного содержания (ПЭС). Данна классификация возмущений N_e и ПЭС, основанная на их пространственно-временных масштабах, величине изменения концентрации электронов и скорости перемещения. Сделан обзор радиофизических методов зондирования ионосферы.

В разделе 1.2 приводятся общие сведения о навигационных системах GPS, ГЛОНАСС [1, 2]. Описаны используемые шкалы времени. Рассмотрена геометрия трансионосферного зондирования с помощью сигналов ГНСС. Определены используемые системы координат. Описан алгоритм расчета направляющих углов луча «приемник–спутник» (угол места θ_s и азимут α_s). Введены важные для GPS-зондирования ионосферы понятия ионосферной и подионосферной точек, приведен алгоритм расчета их координат. Дано описание глобальной и региональных сетей приемников GPS (общее количество наземных приемников в мире к декабрю 2013 г. превысило 3000). Данные GPS-измерений хранятся и передаются в виде текстовых файлов, имеющих специальный формат RINEX. RINEX-файлы с GPS-приемниками, входящими в глобальную сеть, накапливаются на сервере SOPAC (URL: <http://sopac.ucsd.edu>). Изложены методики вычисления ПЭС по данным измерений фазового и группового запаздывания навигационных сигналов, выполняемых приемником GPS/ГЛОНАСС. В заключение дано краткое изложение основ технологии GIM (Global Ionospheric Maps) построения глобальных карт абсолютного вертикального ПЭС, а также описание формата IONEX, разработанного для этих карт [3].

Глава 2 посвящена разработкам в области GPS-зондирования ионосферы, выполненным в диссертации.

В разделе 2.1 проведена оценка характеристик (чувствительность, пространственное и временное разрешение, объем получаемой информации, диапазон измерений) наземных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для регистрации и мониторинга возмущений ионосферной плазмы. Показано, что пространственно-временное разрешение и чувствительность определяют спектр ионосферных неоднородностей, которые могут быть зарегистрированы с помощью сети приемников GPS/ГЛОНАСС. Для организации непрерывного мониторинга ионосферных возмущений наиболее оптимальным является проведение измере-

ний с частотой 1 Гц, обеспечивающее регистрацию всех основных типов ионосферных возмущений при приемлемом объеме получаемых данных. Для обеспечения необходимой чувствительности детектирования ионосферных возмущений расчет ПЭС должен выполняться по данным двухчастотных фазовых измерений.

Рассмотрены особенности организации мониторинга ионосферных возмущений с помощью ГНСС на территории России, основными из которых являются обязательное использование сигналов ГЛОНАСС и создание региональных сетей наземных приемников GPS/ГЛОНАСС. Разработан проект региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири и начато ее развертывание. Размещение приемников в Сибирском регионе производится с учетом использования сети для исследования неоднородностей различных масштабов. Планируемое размещение приемных станций показано квадратами на рис. 1, **а**.

Для исследования крупномасштабных (характерный размер ~ 1000 км) и среднемасштабных (характерный размер ~ 250 км) ионосферных неоднородностей будут организованы два измерительных треугольника в Прибайкалье: большой (Монды–Братск–Узур, MOND–BRAT–UZUR, база ~ 500 км, рис. 1, **б**) и малый (Торы–Усолье-Сибирское–Листвянка, TORY–USOL–LIST, база ~ 100 км, рис. 1, **в**). Такое расположение станций позволяет с помощью разработанных в ИСЗФ СО РАН методов рассчитать горизонтальную скорость и азимут перемещения ПИВ по записям вариаций ПЭС в трех разнесенных в пространстве пунктах.

Планируется организовать также меридиональную цепочку ГНСС-станций в высоких широтах: в населенных пунктах Норильск (KMIS), Туруханск (TURU), Подкаменная Тунгуска (TUNG), Енисейск (ENIS) (база ~ 500 км, рис. 1, **а**) и измерительный треугольник (TUNG–TURU–TURA, база ~ 600 км). Это даст возможность исследовать движение крупномасштабных ионосферных возмущений в меридиональном направлении в приполярных широтах. Для оснащения Сибирской сети разработан автоматический измерительный комплекс на базе приемников Javad Delta-G3T и Javad SigmaQ-G3D. К настоящему времени установлены и функционируют в режиме непрерывных измерений пять приемников в

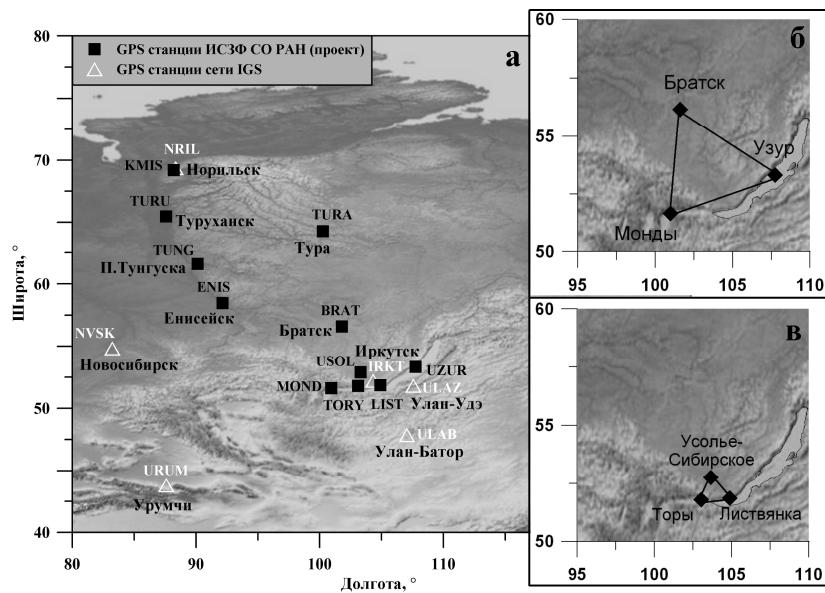


Рис. 1. Действующая сеть GPS-станций IGS и планируемое в ИСЗФ СО РАН размещение приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири.

прибайкальских обсерваториях ИСЗФ СО РАН: TORY, USOL, LIST, MOND, UZUR. Приемники ведут групповые и фазовые измерения сигналов GPS, ГЛОНАСС с частотой 1 Гц.

В разделе 2.2 представлено описание аппаратно-программного комплекса GLOBDET. При активном участии автора в ИСЗФ СО РАН разработан уникальный аппаратно-программный комплекс GLOBDET, обеспечивающий детектирование ионосферных возмущений и определение их параметров на основе обработки данных двухчастотных приемников GPS [4]. Разработанный комплекс представляет собой новый инструмент, который обеспечивает непрерывность зондирования ионосферы, высокую чувствительность измерений, высокое пространственно-временное разрешение, технологичность обработки данных. Основу комплекса составляют методы радиоинтерферометрии, адаптированные для измерения с помощью сигналов GPS. При этом разработанные технологии GPS-интерферометрии достаточно универсальны и могут быть использованы для работы с системой ГЛОНАСС.

Одной из главных задач изучения ионосферных возмущений является определение направления и скорости их перемещения. Для решения этой задачи в комплексе GLOBDET реализовано несколько методов, использующих технологию разнесенного приема. Базовыми являются алгоритмы D1-GPS и SADM-GPS, которые применяются в случаях, когда возмущение ПЭС dI можно считать плоской волной: $dI = I_0 \sin(\Omega t - K_x x - K_y y - K_z z)$, где I_0 – амплитуда возмущения ПЭС; Ω – его угловая частота; K_x , K_y , K_z – проекции волнового вектора \mathbf{K} возмущения ПЭС. Если кривизной фронта возмущения пренебречь нельзя, необходимо использовать алгоритмы когерентной обработки вариаций ПЭС по схеме фазированной антенной решетки (ФАР) [5, 6].

Метод подобных замираний для GPS (D1-GPS). Геометрия GPS-измерений в целом повторяет схему классического радиоинтерферометра, но с одним существенным отличием: в классической схеме приемники располагаются в вершинах прямоугольного треугольника, катеты которого ориентированы на север и восток, схема же расположения приемников GPS совершенно произвольна. В связи с этим проведена адаптация классического метода D1 для GPS-измерений (метод D1-GPS). Формулы для расчета азимута α и горизонтальной компоненты скорости V_h ПИВ имеют вид

$$V_h = \frac{u_x u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{u_y}{u_x}; \quad (1)$$

$$u_x = \frac{x_A y_C - x_C y_A}{y_C(t_A - t_B) - y_A(t_C - t_B)}; \quad (2)$$

$$u_y = \frac{x_A y_C - x_C y_A}{x_A(t_C - t_B) - x_C(t_A - t_B)},$$

где u_x , u_y – скорости перемещения волнового фронта возмущения вдоль осей X и Y; t_A , t_B , t_C – время регистрации характерных минимумов (максимумов) на записях в пунктах A, B, C; (x_A, y_A) , (x_B, y_B) , (x_C, y_C) – координаты пунктов A, B, C.

Метод SADM-GPS. Под руководством профессора Э.Л. Афраймовича и при участии автора разработан статистический метод (SADM-GPS) определения гори-

зонтальной скорости и азимута перемещения ПИВ по временной (I'_t) и пространственным (I'_x , I'_y) производным ПЭС. Для вычисления V_h и α используются ряды «наклонных» значений ПЭС в трех выбранных пунктах $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$, ряды азимутов $\alpha_S(t)$ и ряды углов места $\theta_S(t)$ лучей «приемник–спутник». При этом для расчета абсолютного значения V_h горизонтальной скорости ПИВ необходимо учитывать скорость w перемещения ионосферной точки [7]:

$$\begin{aligned}
 I'_x &= \frac{y_C(I_A - I_B) - y_A(I_C - I_B)}{x_A y_C - x_C y_A}, \quad I'_y = \frac{x_A(I_C - I_B) - x_C(I_A - I_B)}{x_A y_C - x_C y_A}, \quad I'_t = \frac{I_B^{i+1} - I_B^i}{dt}, \\
 u_x &= \Omega/K_x = I'_t/I'_x, & u_y &= \Omega/K_y = I'_t/I'_y, \\
 u &= \frac{u_x u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}, & \alpha &= \arctg(u_y/u_x), \\
 x_p &= h_{\max} \sin \alpha_S \operatorname{ctg} \theta_S, & y_p &= h_{\max} \sin \alpha_S \operatorname{ctg} \theta_S, \\
 w_x &= x_p/t, & w_y &= y_p/t, \\
 V_h &= u + w_x \sin \alpha + w_y \cos \alpha,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где i – номер временного отсчета; dt – интервал между временными отсчетами; x_p , y_p , z_p – координаты ионосферной точки в топоцентрической системе координат, связанной с приемником B; w_x , w_y – компоненты горизонтальной скорости ионосферной точки; h_{\max} – высота главного максимума ионизации (область F2), на которой рассчитываются координаты ионосферной точки. Мгновенные значения α и V_h , рассчитанные по формулам (3), используются для построения на выбранном интервале времени функций распределения азимута $P(\alpha)$ и скорости $P(V_h)$. Далее с помощью оценки среднеквадратичного отклонения (СКО) азимута производится анализ распределения $P(\alpha)$ на наличие выделенного направления. Если СКО заметно меньше 90° , можно считать, что ПИВ перемещается в направлении среднего значения азимута. Средняя скорость перемещения определяется по распределению $P(V_h)$ или путем усреднения мгновенных значений скорости $V_h(t)$.

Расчет угла места и модуля скорости ПИВ. Одним из ключевых новшеств программного комплекса GLOBDET является возможность вычисления угла места волнового вектора K и модуля скорости V перемещения ПИВ. Эта возможность основана на использовании ракурсной зависимости амплитуды ПИВ: максимум амплитуды наблюдается для тех ПИВ, волновой вектор которых перпендикулярен направлению луча «приемник–спутник». Используя это условие при известных α и V_h , угол места θ волнового вектора и модуль скорости V можно определять: как [4] $\theta = \arctg\{-\cos(\alpha_S - \alpha)/\operatorname{tg} \theta_S\}$, $V = V_h \cos \theta$.

Определение координат источника ПИВ. На основе рассчитанных с помощью методов D1-GPS и SADM-GPS параметров ионосферного возмущения был предложен способ оценки координат локализованных источников (землетрясения, промышленные взрывы, запуски космических аппаратов) [8]. Зная из расчетов (по методу D1-GPS или SADM-GPS) направление волнового вектора ионосферного возмущения, можно определить, в какой точке вектор пересекает горизонтальную плоскость на высоте h_q источника, и рассчитать координаты этой точки.

В разделе 2.3 дано описание методики тестирования алгоритмов GPS-зондирования. Применимость и адекватность алгоритмов комплекса GLOBDET трудно оценить без компьютерного моделирования. С этой целью автором разработана методика тестирования алгоритмов GPS-зондирования на основе моделирования. Создана модель, которая обеспечивает расчет пространственно-временного распределения концентрации электронов N_e в ионосфере и вычисление ПЭС вдоль лучей «приемник–спутник» с использованием координат пунктов приема и навигационных спутников. Модельные ряды ПЭС аналогичны экспериментальным рядам, и обрабатывать их можно так же, как экспериментальные данные. Модель позволяет описывать эксперименты для GPS-приемников, расположенных как на земной поверхности, так и на борту космических аппаратов.

Электронная концентрация N_e в модели представляется суммой двух составляющих (регулярной ионизации и возмущений):

$$N_e(t, r') = N_0(r') \times N_t(t, \varphi, \ell) \times \left[1 + \sum_{i=0}^{ND} N_{di}(t, r') \right], \quad (4)$$

где $N_0(r')$ – среднесуточное сферически-симметричное распределение N_e вдоль радиус-вектора в геоцентрической системе координат; $N_t(t, \varphi, \ell)$ – функция, задающая временные и широтно-долготные изменения регулярной ионизации; $N_{di}(t, r')$ – функции, описывающие форму возмущений электронной концентрации, а ND – число таких возмущений.

Регулярная ионизация учитывает высотное распределение N_e ; суточные и сезонные изменения концентрации, определяемые зенитным углом Солнца; главный ионосферный провал в широтном распределении N_e . Модель позволяет описать возмущения нескольких типов:

1) возмущения N_e в виде изолированной неоднородности. Неоднородность имеет форму эллипсоида (в частном случае – шара), вытянутого вдоль заданных направлений. Концентрация внутри неоднородности плавно меняется (возрастает или убывает) от центра к периферии;

2) возмущения N_e в виде дискретной суперпозиции плоских бегущих волн;

3) возмущения N_e в виде перемещающихся волновых пакетов.

Для расчетов ПЭС кроме распределения N_e в ионосфере необходимо также знать траекторию движения спутника. Программный комплекс модели предусматривает следующие возможности для задания траектории навигационного ИСЗ (НИСЗ):

- моделирование видимого движения НИСЗ через задание алгоритмов изменения угла места $\theta_S(t)$ и азимута $\alpha_S(t)$ спутника;
- моделирование орбит НИСЗ;
- использование реальных угловых координат НИСЗ, которые входят в набор стандартной информации, получаемой с навигационных спутников.

При расчете ПЭС $\Gamma^m(t)$ вдоль луча «приемник–спутник» интегрирование ограничивается нижней $r'_{bot}(t)$ и верхней $r'_{top}(t)$ границами ионосферы, на которых можно считать $N_e=0$:

$$I^m(t) = \int_{r'_{\text{bot}}(t)}^{r'_{\text{top}}(t)} N_e(t, r') ds.. \quad (5)$$

Это существенно уменьшает объем проводимых вычислений. Чтобы приблизить модельные расчеты к реальному эксперименту, используется процедура добавления случайного шума, имитирующего помехи различного рода. В целях оценки ракурсных условий на исследуемой траектории модель дополнена модулем для расчета зависимости $M(t)$ амплитуды возмущения ПЭС, а также углов между лучом «приемник–спутник» и волновым вектором ПИВ.

Компьютерное моделирование определения ПЭС использовалось в нескольких целях. Изучение влияния ракурсного эффекта на амплитуду возмущений ПЭС наглядно показало, что в случае, когда возмущение распространяется вдоль луча «приемник–спутник», амплитуда отклика ПЭС близка к уровню шумов. Методы исследования параметров ионосферных возмущений, генерируемых запусками ракет, разрабатывались для глобальной навигационной системы GPS. В диссертации проведена оценка возможности регистрации отклика ПЭС на старты космических аппаратов с помощью навигационной системы «Transit». Установлено, что в силу высокой скорости движения НИСЗ система «Transit» не обеспечивает уверенных регистраций и определения параметров короткопериодных волновых возмущений ПЭС. Тестирование с помощью модели метода SADM-GPS, показало, что метод позволяет определять вектор скорости перемещения возмущений для всех возможных значений азимута; в случае монохроматических колебаний ПЭС азимут определяется с точностью 2–3°, а точность определения горизонтальной компоненты скорости составляет 6–10 %; помехи снижают точность определения скорости до 20–25 %, при этом существенно увеличивая разброс значений азимута. В результате оценки с использованием модели коэффициента пропорциональности между относительными амплитудами вариаций ПЭС dI/I и возмущений электронной концентрации dN_e/N_e установлено, что в силу интегрального характера ПЭС в различных условиях наблюдений dI/I может составлять 0–60 % от dN_e/N_e .

В разделе 2.4 решен ряд методических вопросов зондирования ионосферы сигналами GPS, ГЛОНАСС. Выявлены особенности наблюдения спутников GPS, ГЛОНАСС в высоких широтах. Показано, что благодаря высоте орбит ИСЗ, начиная с некоторой широты, приемник может принимать сигналы навигационных спутников, расположенных за полюсом. Это делает возможным исследование полярных областей с помощью наземных приемников GPS/ГЛОНАСС. Система ГЛОНАСС более удобна в этом отношении: за счет большего угла наклонения орбит использование данных «заполярных» НИСЗ ГЛОНАСС возможно уже с широты 49.5°, в то время как для GPS эта широта составляет 58.7°. Выполнена оценка применимости используемых приближений для фазового и группового показателя преломлений. Проведена оценка величины изменения набега фазы $\Delta\phi_{1,2}$, группового пути $\Delta P_{1,2}$ и времени распространения $\Delta\tau_{1,2}$ навигационного радиосигнала для двух рабочих частот GPS/ГЛОНАСС $f_{1,2}$ при изменении ПЭС на 1 TECU (таблица). Показано, что

тропосферная задержка не оказывает влияния на вариации ПЭС, рассчитанные по двухчастотным фазовым измерениям. Получены оценки характерных значений амплитуды суточных вариаций ПЭС в спокойных геомагнитных условиях для трех широтных диапазонов.

В разделе 2.5 обобщены результаты работ, изложенные в главе 2.

Изменения набега фазы, группового пути и времени распространения сигнала для частот GPS, ГЛОНАСС при увеличении ПЭС на 1 TECU

$f_{1,2}$, МГц	$\Delta\phi_{1,2}$, рад	$\Delta\phi_{1,2}$, обороты	$\Delta P_{1,2}$, м	$\Delta\tau_{1,2}$, нс	$\Delta\text{ПЭС}$, TECU
GPS					
1575.42	-5.362	-0.853	0.162	0.54	1
1227.6	-6.881	-1.095	0.268	0.89	1
ГЛОНАСС					
1603	-5.270	-0.839	0.157	0.52	1
1247	-6.774	-1.078	0.259	0.87	1

Глава 3 посвящена обсуждению результатов исследования отклика ионосферы на геомагнитные возмущения.

В разделе 3.1 изложены результаты изучения параметров крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМ ПИВ), полученные с помощью системы GLOBDET, во время ряда сильных геомагнитных бурь 1998–2004 гг. Представлены также результаты комплексных (с использованием приемников GPS, ионозондов, радара некогерентного рассеяния) экспериментов по регистрации ионосферных эффектов магнитных бурь. На основе данных глобальной сети приемников GPS с высоким пространственно-временным разрешением определены характеристики КМ ПИВ, генерируемых в авроральных зонах во время геомагнитных возмущений. Показано, что такие возмущения имеют длительность 40–60 мин, перемещаются со скоростью 250–1600 м/с (скорость различна для разных бурь) в целом в экваториальном направлении. Протяженность фронта авроральных КМ ПИВ превышает 3000 км. Параметры КМ ПИВ согласуются с данными других исследователей (см., например, 9, 10]). Относительная амплитуда возмущения ПЭС варьирует для разных бурь от 5 до 14 %, что, как показано путем сопоставления с результатами измерений на ионозондах и радаре НР, соответствует относительной амплитуде возмущений электронной концентрации в максимуме F-слоя 5–50 %. Практически синхронно аналогичные крупномасштабные возмущения регистрируются и на станциях GPS Южного полушария.

В разделе 3.2 описаны результаты исследования динамики возмущений ПЭС в авроральной зоне после внезапного начала магнитной бури (sudden storm commencement, SSC) и свойств КМ ПИВ, возникающего после SSC. Для изучения глобальной картины отклика ионосферы на SSC предложен специальный метод построения пространственного распределения интенсивности вариаций ПЭС: на карту наносятся положения ионосферных точек лучей «приемник–спутник», в которых зарегистрированы минимумы и максимумы вариаций ПЭС (рис. 2). С по-

мощью данного метода впервые экспериментально установлено, что после SSC в авроральной зоне можно выделить два типа возмущений ПЭС. Возмущения первого типа представляют собой квазихаотические флуктуации ПЭС внутри области, ограниченной южной границей аврорального овала.

Возмущения второго типа (КМ ПИВ) носят характер крупномасштабных уединенных волн с периодом 40–60 мин, которые генерируются на южной границе аврорального овала (на всем ее протяжении) и распространяются в направлении экватора до широт 40–30°. Толстыми сплошными линиями на рис. 2, **а**, **б** показаны положение и форма волнового фронта КМ ПИВ во время магнитных бурь 29.10.2003 и 11.09.2005, полученные аппроксимацией распределения минимумов (черная кривая) и максимумов (серая кривая) ПЭС эллипсом. Аппроксимация показала, что для обеих магнитных бурь эксцентриситет e эллипса меняется в пределах 0.03–0.6. Примерно в 70 % случаев $e < 0.3$, т. е. форма фронта КМ ПИВ близка к окружности.

Длину волны КМ ПИВ можно оценить по расстоянию между аппроксимированными положениями максимумов и минимумов в один и тот же момент времени. В период бури 29.10.2003 длина волны оказалась равной 1300 км, а во время бури 11.09.2005 – 800 км. По смещению волнового фронта в последова-

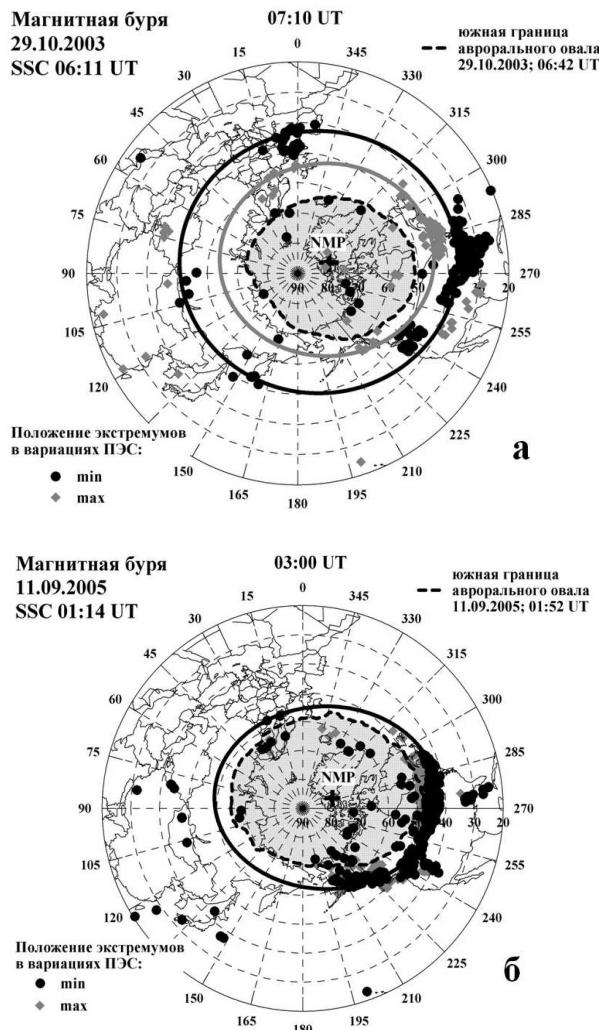


Рис. 2. Распределение интенсивности вариаций ПЭС и форма волнового фронта КМ ПИВ в 07:10 UT 29.10.2003 (**а**) и в 03:00 UT 11.09.2005 (**б**).

тельные моменты времени проведена оценка меридиональной скорости V_r распространения КМ ПИВ: во время бури 29.10.2003 скорость $V_r \approx 580$ м/с, в период бури 11.09.2005 $V_r \approx 320$ м/с. Таким образом, длина волны и скорость распространения КМ ПИВ различны для разных бурь, что, возможно, связано с интенсивностью бури и состоянием атмосферы.

Для исследований динамики ПЭС в ароральной зоне после SSC с помощью алгоритма SADM-GPS в пяти долготных секторах Северного полушария (западно-американский, восточно-американский, европейский, азиатский, дальневосточный) были рассчитаны скорость и направление перемещения КМ ПИВ. Установлено, что скорость и направление распространения возмущения имеют ярко выраженную долготную зависимость. Наименьшая скорость регистрируется в ночном полушарии, где значения ПЭС минимальны, а наибольшая – на дневной стороне, где значения ПЭС максимальны. В ночном и дневном секторах направление распространения близко к меридиональному, а в утреннем и вечернем – к зональному.

Отклонение азимута перемещения КМ ПИВ, образовавшихся в результате геомагнитных бурь, от экваториального направления отмечалось неоднократно [11, 12]. Чаще всего это связывают либо с влиянием силы Кориолиса, либо с воздействием термосферного ветра на распространение акусто-гравитационных волн в атмосфере. В диссертации впервые показано, что на интерпретацию результатов наблюдений может также оказывать влияние используемая методика расчетов: если волновое возмущение, возникшее на границе арорального овала, распространяется радиально от источника (т. е. вдоль геомагнитного меридиана), то скорость его распространения, рассчитанная в географической системе координат, будет иметь как меридиональную, так и зональную составляющие.

В разделе 3.3 обобщены результаты работ, изложенные в главе 3.

Глава 4 содержит описание результатов исследований отклика ионосферы на тропические циклоны (ТЦ) по данным вертикального и GPS-зондирования с использованием метеорологических данных архива NCEP/NCAR Reanalysis.

В разделе 4.1 сделан обзор современного состояния исследований в данной области и выделены особенности изучения влияния тропических циклонов на ионосферу. Установлено, что регистрация слабых откликов ионосферы на тропические циклоны требует тщательного учета геофизической обстановки. Основными факторами, маскирующими эффекты тропических циклонов в верхней ионосфере, являются геомагнитные бури, экваториальная аномалия ионизации, солнечные вспышки, солнечный терминатор. Выделение и идентификация откликов ионосферы на тропические циклоны возможны в спокойной гелиогеофизической обстановке в ночные часы местного времени, когда фоновые пространственно-временные вариации ПЭС характеризуются слабой изменчивостью. Из-за сильной изменчивости ионосферных параметров при изучении откликов ионосферы на ТЦ особое внимание следует уделять поиску усиления интенсивности колебаний различных временных масштабов в вариациях ионосферных параметров. Для уверененной идентификации отклика ионосферы на тропический циклон необходим учет ветрового и температурного режима атмо-

сферы, а также сравнительный анализ поведения ионосферных и метеорологических параметров в исследуемом регионе.

В разделе 4.2 представлены результаты изучения возмущений ионосферной плазмы во время ТЦ KATRINA, действовавшего 23–31 августа 2005 г. вблизи Атлантического побережья США. Регистрацию откликов на ТЦ KATRINA осложнили две мощные магнитные бури. Подробный анализ геофизических условий для ТЦ KATRINA показал, что поиск ионосферных возмущений, обусловленных воздействием этого циклона, следует проводить: а) в период 27–30 августа, когда геомагнитная обстановка была достаточно спокойной ($D_{st} \geq -50$, $K_p \leq 3$), а циклон находился в максимальной фазе развития; б) в вечерние илиочные часы местного времени, когда отсутствовала экваториальная аномалия ионизации.

Для идентификации ионосферных возмущений, обусловленных воздействием ТЦ, предложена методика сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС и карт приземных метеорологических параметров, построенных по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. С целью определения пространственной локализации наблюдаемых возмущений ПЭС на карту наносятся траектории ионосферных точек лучей «приемник–спутник», при этом положение каждой ионосферной точки отображается кругом, радиус которого пропорционален абсолютному значению отфильтрованного ПЭС $|dI(t)|$, зарегистрированного на данном луче в данный момент времени (рис. 3). Полученные пространственные распределения амплитуды возмущений ПЭС дают возможность провести их сопоставление с картами метеорологических параметров, построенными по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. Возмущения ПЭС во время ТЦ KATRINA сравнивались с поведением приземного давления (рис. 3), зональной и меридиональной скоростями ветра.

Во время действия ТЦ KATRINA в спокойных геофизических условиях выявлено усиление колебаний ПЭС в диапазонах периодов 02–20, 15–40, 20–60 мин. Сравнительный анализ динамики пространственного распределения возмущений ПЭС и карт метеорологических параметров позволил с высокой степенью уверенности заключить, что обнаруженное усиление колебаний ПЭС обусловлено воздействием ТЦ KATRINA. Пространственное распределение и характер поведения возмущений ПЭС, зарегистрированных во время ТЦ KATRINA, свидетельствуют о том, что над траекторией циклона на высотах ионосферы существовала область неоднородностей ионосферной плазмы. Область сформировалась, когда ТЦ достиг стадии урагана, и перемещалась вслед за движением циклона. В период максимально развития ТЦ KATRINA возмущения ПЭС с малыми периодами (02–20 мин) наблюдались на расстояниях не более 2000 км от центра циклона. Колебания с периодами 20–60 мин регистрировались на больших расстояниях. Это подтверждает теоретические расчеты [13], показавшие, что над местом локального возмущения атмосферы в силу быстрого затухания из-за вязкости и теплопроводности должны наблюдаться акустико-гравитационные волны (АГВ) с периодами в несколько минут. На больших горизонтальных расстояниях от источника в атмосфере будут регистрироваться внутренние гравитационные волны (ВГВ) с периодами от десятков

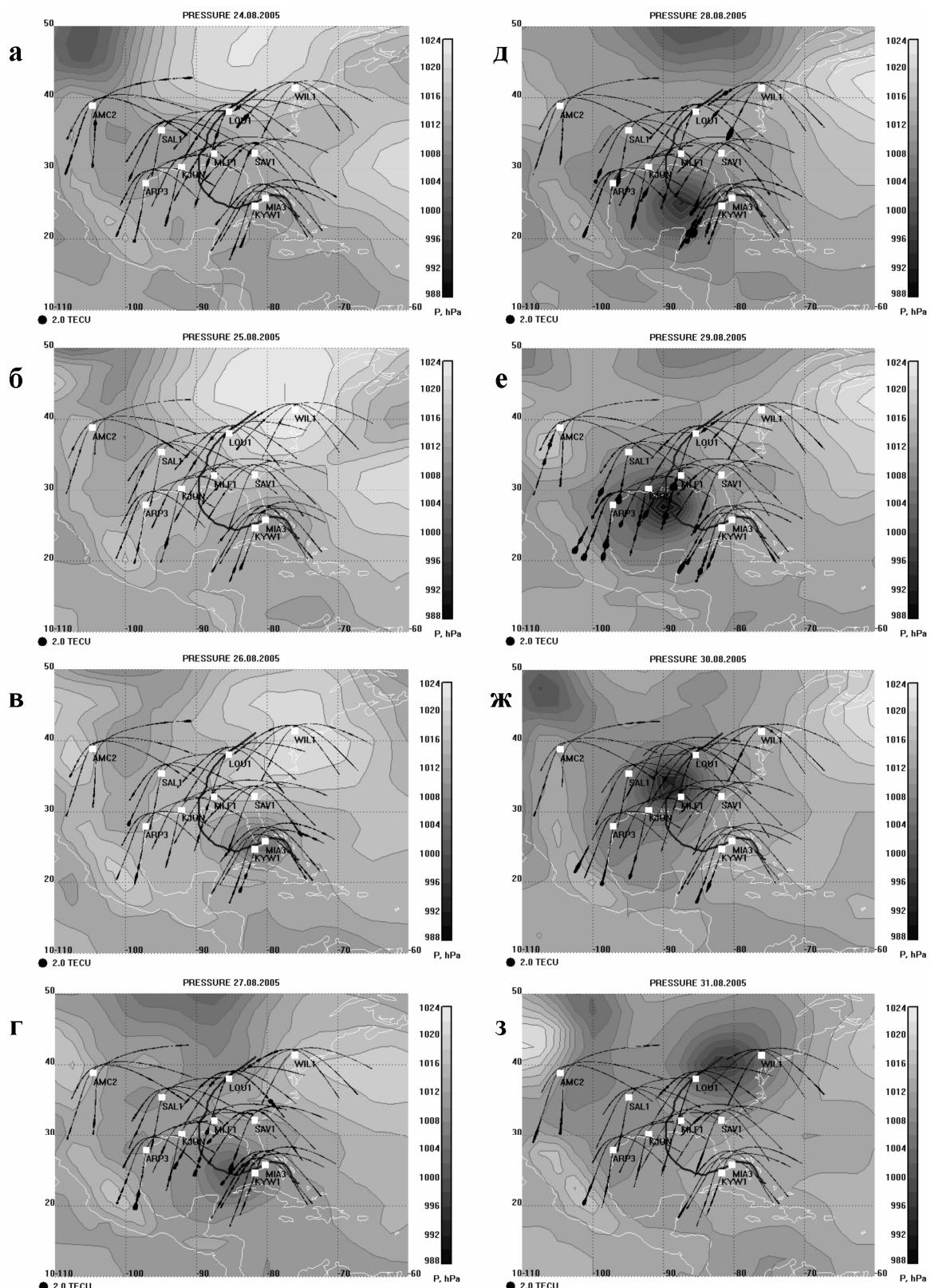


Рис. 3. Пространственно-временные распределения интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02–20 мин (черные линии переменной толщины) и приземного давления (заливка) в зоне действия ТЦ KATRINA 24–31 августа 2005 г. Толстая черная линия отображает траекторию движения ТЦ KATRINA по данным сайта www.nhc.noaa.gov. Квадратами отмечено положение станций GPS.

минут до 2–3 ч. Амплитуда длиннопериодных (20–60 мин) колебаний ПЭС возрастала сильнее амплитуды короткопериодных (02–20 мин) возмущений: среднее увеличение амплитуды длиннопериодных возмущений относительно спокойного уровня составляло 0.7–0.8 ТЕСУ, короткопериодных – 0.3–0.4 ТЕСУ.

В разделе 4.3 приведены результаты сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС и карт приземных метеорологических параметров во время ТЦ RITA (18–26 сентября 2005 г.) и WILMA (15–25 октября 2005 г.), действовавших у Атлантического побережья США. Установлено, что над зонами действия циклонов в спокойной геофизической обстановке наблюдалось усиление интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02–20 и 20–60 мин. Интенсивность колебаний ПЭС была выше на лучах «приемник–спутник», которые проходили ближе к траектории ТЦ. В колебаниях с периодами 20–60 мин возмущения ПЭС были выражены сильнее, чем в колебаниях с периодами 02–20 мин. Среднее увеличение амплитуды длиннопериодных (20–60 мин) возмущений относительно спокойного уровня составляло 0.7–0.8 ТЕСУ. Амплитуда колебаний с периодами 02–20 мин возрастала в среднем на 0.3–0.4 ТЕСУ. Отклик ионосферы на ТЦ RITA и WILMA был заметно слабее, чем на ТЦ KATRINA. Анализ высотных профилей давления, температуры, скорости ветра над зонами действия трех циклонов показал, что ТЦ KATRINA прослеживался до высоты 12 км, а ТЦ RITA и WILMA – только до 8 км. В силу этого ТЦ KATRINA мог оказаться более сильное воздействие на ионосферу.

В разделе 4.4 описаны результаты изучения возмущения ионосферных параметров во время крупных ТЦ в северо-западной части Тихого океана в сентябре–ноябре 2005 г., выполненных по данным зондирования ионосферы сигналами GPS и ионозондов. Для анализа ионосферных параметров использовался одночастотный алгоритм поиска периодичностей для временных рядов, разработанный в ИСЗФ СО РАН [14]. По данным ионозондов и GPS-станций в Восточно-Сибирском и Дальневосточном регионах России, а также в Китае и в Австралии выявлены возмущения, которые с наибольшей вероятностью могут быть связаны с циклонической активностью в северо-западной части Тихого океана в сентябре–ноябре 2005 г. Возмущения проявлялись в существенном отклонении критической частоты f_0F2 и высоты $h'F$ основания слоя F2 от медианных значений, в усиении интенсивности колебаний f_0F2 и $h'F$ с периодами 1.5–6 ч, в усиении интенсивности колебаний ПЭС с периодами 60–90 мин. В поведении высоты максимума h_mF2 слоя F2 заметных отклонений не наблюдалось. В большинстве случаев зарегистрированные возмущения ионосферных параметров совпадали с максимальными фазами развития тропических циклонов, действовавших у Тихоокеанского побережья Азии. Несколько одновременно действующих мощных циклонов могут формировать возмущенную обстановку в атмосфере, воздействие которой на F-область окажется более интенсивным и может быть обнаружено на расстояниях до 3000–4000 км.

Полученные нами результаты согласуются с результатами анализа временных вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов наклонного зондирования вдоль среднеширотной односкачковой трассы Магадан–Иркутск,

в результате которого был зарегистрирован рост энергетики колебаний МНЧ во время действия ТЦ в Тихом океане [15, 16].

В разделе 4.5 сделано обобщение результатов работ, изложенных в главе 4. Характер поведения и пространственное распределение зарегистрированных возмущений ионосферных параметров свидетельствуют о том, что над траекторией циклона на высотах ионосферы существует область неоднородностей ионосферной плазмы. Область формируется, когда циклон достигает стадии урагана, имеет горизонтальную протяженность около 2000 км и перемещается вслед за движением циклона. На амплитуду ионосферного отклика на ТЦ оказывают влияние мощность циклона, характер высотного распределения метеорологических параметров (температура, давление, скорость ветра) над зоной действия ТЦ, другие ТЦ, действующие в регионе. Совместное действие нескольких мощных тропических циклонов (как в случае с ТЦ DAMREY, SAOLA, LONGWANG в Тихом океане) может оказывать более интенсивное воздействие на ионосферу, чем отдельный циклон; такое воздействие может быть обнаружено на расстояниях до 3000–4000 км.

Глава 5 посвящена исследованиям отклика ионосферы на землетрясения различной интенсивности.

В разделе 5.1 описаны характеристики (магнитуда, энергетический класс, балльность) и классификация землетрясений. Дан обзор современного состояния исследований.

В разделе 5.2 рассматриваются возмущения ПЭС во время сильных землетрясений ($M_w > 7.0$) в Японии (11.03.2011), в Турции (17.08.1999 и 12.11.1999), вблизи о. Суматра (04.06.2000, 10.01.2012, 11.04.2012), у побережья Сальвадора (13.01.2001).

В результате изучения отклика ионосферы на мощное землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. выявлено, что данное землетрясение вызвало образование целого спектра перемещающихся ионосферных возмущений с длинами волн от 200 до 600 км и скоростями от 150 до 2600 м/с. Анализ временной последовательности карт возмущений ПЭС (рис. 4) позволил выявить возмущения двух типов (крупномасштабные и среднемасштабные ПИВ), близких по форме к кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Наличие кольцевых волн отмечается в большинстве работ, посвященных ионосферным эффектам этого землетрясения [17, 18]. Использование метода SADM-GPS дало возможность построить карты скоростей перемещения зарегистрированных крупномасштабных и среднемасштабных ПИВ (рис. 5). По данным карт возмущений ПЭС (рис. 4), а также карт поля скоростей ПИВ (рис. 5) определены характеристики двух указанных типов возмущений ПЭС. Крупномасштабные ПИВ регистрировались в период времени 05:50–06:25 UT, имели длину волны $\lambda \approx 600$ км и распространялись со средней скоростью 724 м/с. Среднемасштабные ПИВ наблюдались позднее (после 06:25 UT), их длина волны $\lambda \approx 200$ км, а средняя горизонтальная скорость распространения (359 м/с) была значительно ниже скорости крупномасштабных волн.

Анализ диаграмм «дальность–время» в различных направлениях от эпицентра выявил несколько мод, распространяющихся с различными скоростями:

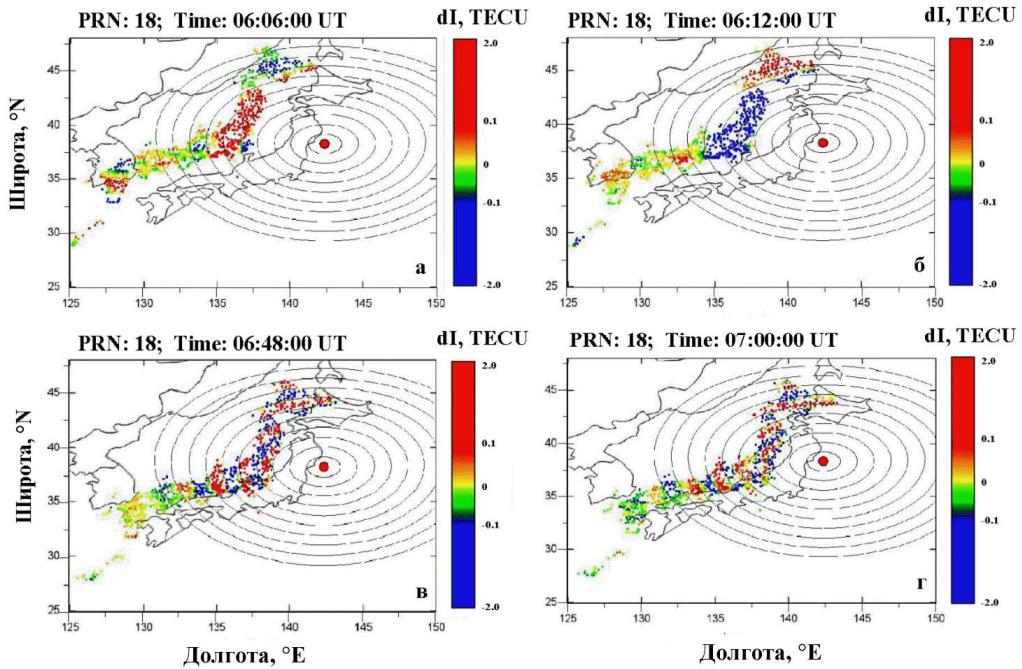


Рис. 4. Пространственные вариации возмущений ПЭС после землетрясения в Японии 11 марта 2011 г., полученные для спутника GPS PRN18. Справа от панелей даны шкалы интенсивности возмущений ПЭС. Крупной точкой показан эпицентр землетрясения.

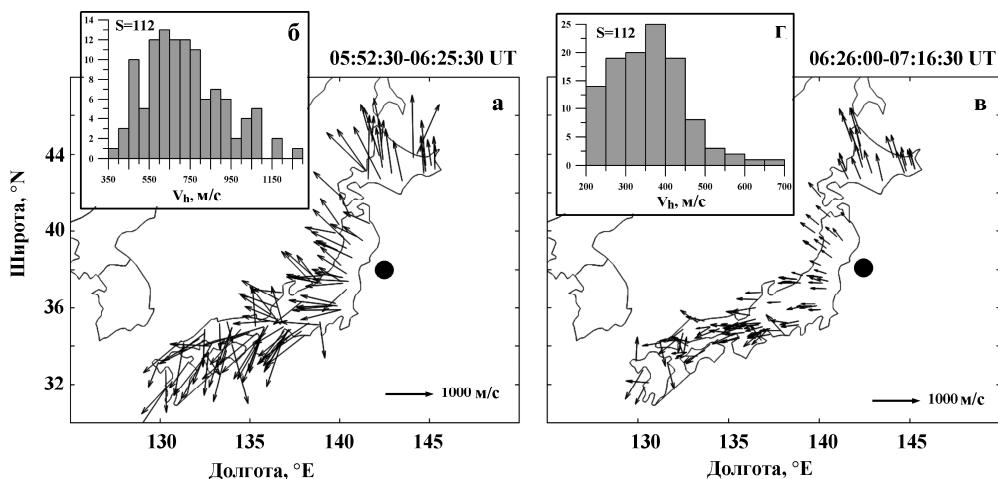


Рис. 5. Пространственные распределения скорости и направления перемещения крупномасштабных (а) и среднемасштабных (б) возмущений ПЭС 11 марта 2011 г. Точкой показан эпицентр землетрясения. Гистограммы скоростей крупномасштабных (б) и среднемасштабных (г) ПИВ.

2200–2600 м/с (быстрая мода, связанная с распространением волны Рэлея), 700–1000 м/с (мода, обусловленная сгенерированными в эпицентре акустическими волнами), 150–300 м/с (гравитационная мода атмосферных волн, вызванных землетрясением). Скорости каждой из мод возмущений в различных направлениях от эпицентра достаточно близки, в то время как амплитуда возмущений ПЭС зависит от направления их распространения.

С помощью комплекса GLOBDET определены основные параметры возмущений ПЭС, вызванных крупными землетрясениями в Турции (17.08.1999 и 12.11.1999), у о. Суматра (04.06.2000, 10.01.2012 и 11.04.2012), вблизи побережья Сальвадора (13.01.2001). Характеристики ионосферных откликов на дан-

ные землетрясения достаточно близки. Возмущения ПЭС имели N-образную форму, соответствующую классической форме ударной волны, длительность 180–600 с и амплитуду 0.07–0.3 ТЕСУ, в 2–2.5 раза превышающую уровень фоновых флюктуаций в умеренных геомагнитных условиях. Горизонтальная скорость перемещения возмущений (800–1400 м/с) была близка к скорости звука на высотах ионосферы. Отмечена тенденция увеличения средней амплитуды отклика с ростом магнитуды землетрясения. В то же время отклики были более ярко выражены для землетрясений, имевших существенную вертикальную составляющую в очаге, что свидетельствует о влиянии фокального механизма на формирование ионосферных откликов на землетрясения.

В разделе 5.3 обсуждается реакция ПЭС на землетрясения с магнитудами $6.5 \leq M_w \leq 7.0$ в Туве (27.12.2011, 26.02.2012) и в Греции (08.01.2006). После двух Тувинских землетрясений на отдельных лучах «приемник–спутник» на расстояниях 500–800 км от эпицентра были зарегистрированы волновые возмущения ПЭС с небольшой амплитудой (~0.1 ТЕСУ) и периодом ~10 мин. Горизонтальная скорость перемещения возмущений составляла около 200 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере. Похожая картина наблюдалась после землетрясения в Греции 08.01.2006: на нескольких лучах «приемник–спутник» наблюдались волновые возмущения ПЭС, возможно вызванные данным сейсмическим событием. Повышенный уровень фоновых вариаций ПЭС 5–9 января 2006 г. затруднил выделение и идентификацию откликов на землетрясение. Таким образом, в отличие от сильных землетрясений, отклики на землетрясения с магнитудами $6.5 \leq M_w \leq 7.0$ регистрируются лишь на отдельных лучах «приемник–спутник», имеют малую амплитуду и трудно определяемы на уровне фоновых колебаний.

В разделе 5.4 рассмотрено поведение вариаций ПЭС во время слабых землетрясений ($M_w < 6.5$). Проведено исследование поведения ионосферы во время наиболее крупных сейсмических событий в Байкальском регионе периода 1999–2012 гг. (в том числе – Култукского землетрясения 27.08.2008), а также пяти землетрясений 2011 г. в Японии. Показано, что землетрясения с $M_w \leq 6.3$ не вызывают заметных изменений в поведении ПЭС: амплитуда колебания ПЭС после таких землетрясений не превышает уровня фоновых флюктуаций.

В разделе 5.5 проведен анализ полученных результатов. Установлено, что после землетрясений с магнитудами 4.1–6.3 волновые возмущения в вариациях ПЭС не наблюдаются. Отклики на землетрясения с $M_w = 6.6–6.7$ регистрируются на отдельных лучах «приемник–спутник», имеют небольшую амплитуду; их трудно выделять на уровне фоновых колебаний. Возмущения ПЭС, вызванные сильными землетрясениями с магнитудами $7.1 \leq M_w \leq 9.0$, в целом регистрируются уверенно, что позволяет определять их характеристики и рассчитывать параметры движения. Полученные результаты подтвердились анализом литературных данных, показавшим, что землетрясения, оказавшие заметное влияние на ионосферную плазму, имели магнитуду не ниже 6.5.

Обобщение полученных результатов и опыта других исследователей позволило сделать заключение, что существует некоторое пороговое значение магнитуды, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС в ионосфере, вызванных землетрясением, не наблюдается. Пороговое значение лежит вблизи $M_w = 6.5$. На вероятность регистрации волновых возмущений ПЭС после земле-

трясения с магнитудой, близкой к пороговому значению, большое влияние оказывает геофизическая обстановка (состояние нейтральной атмосферы, уровень геомагнитной возмущенности и т. д.), а также наличие достаточного количества станций GPS в районе землетрясения. При малых магнитудах сейсмической энергии, очевидно, недостаточно для возбуждения волн в нейтральной атмосфере, способных вызвать возмущения ПЭС в ионосфере, различимые на уровне фоновых флюктуаций. Для землетрясений с $Mw > 6.5$ заметное влияние на формирование и интенсивность волновых возмущений в ионосфере оказывает также механизм очага землетрясения. Можно ожидать, что вертикальные смещения земной поверхности более эффективны как источник внутренних волн в атмосфере, следствием которых являются ионосферные возмущения.

В разделе 5.6 обобщены результаты работ, изложенные в главе 5.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В Приложении представлены преобразования координат, используемые в практике GPS-измерений.

Заключение

При исследованиях возмущений ионосферной плазмы, обусловленных влиянием магнитосферы, нейтральной атмосферы, литосферы, проведенных на основе разработанных методов дистанционного зондирования ионосферных возмущений по данным двухчастотных приемников навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, получены следующие основные результаты.

1. С помощью разработанных в диссертации технологий впервые одновременно для всего долготного интервала Северного полушария экспериментально показано, что после внезапного начала магнитной бури в авроральной зоне можно выделить два типа возмущений ПЭС: квазихаотические флюктуации ПЭС внутри южной границы аврорального овала; крупномасштабные волны с периодами 40–60 мин, которые генерируются на всем протяжении южной границы аврорального овала и распространяются в направлении экватора до широт 40–30°. Скорость и направление распространения крупномасштабных волн имеют ярко выраженную долготную зависимость.

2. Для изучения влияния тропических циклонов (ТЦ) на ионосферу предложена методика сравнительного анализа пространственно-временной динамики возмущений ПЭС и карт приземных метеорологических параметров, построенных по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. С помощью разработанных методов исследованы вариации ионосферных параметров во время действия ряда мощных тропических циклонов. Установлено, что над зоной действия ТЦ на высотах ионосферы существует область неоднородностей ионосферной плазмы с характерными временными периодами 02–60 мин. Область формируется, когда циклон достигает стадии урагана, имеет горизонтальную протяженность около 2000 км и перемещается вслед за движением циклона. Впервые показано, что на амплитуду ионосферного отклика на ТЦ оказывает влияние характер высотного распределения метеорологических параметров над зоной действия ТЦ.

3. Впервые выполнен сравнительный анализ отклика ионосферы на землетрясения различной интенсивности (магнитуды $4.1 \leq Mw \leq 9.0$), в том числе на

наиболее крупные землетрясения (магнитуды $4.1 \leq M_w \leq 6.7$), зафиксированные в Байкальском регионе в 1999–2012 гг. Установлено существование порогового значения магнитуды $M_w \approx 6.5$, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС в ионосфере, вызванных землетрясением, не наблюдается. На вероятность регистрации волновых возмущений ПЭС после землетрясения с магнитудой, близкой к пороговому значению, большое влияние оказывает геофизическая обстановка (состояние нейтральной атмосферы, уровень геомагнитной возмущенности и т. д.), а также наличие достаточного количества станций GPS в районе эпицентра. При малых магнитудах сейсмической энергии, очевидно, недостаточно для возбуждения в нейтральной атмосфере волн, способных вызвать возмущения ПЭС в ионосфере, различимые на уровне фоновых флюктуаций.

4. В результате изучения отклика ионосферы на мощное землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. выявлено, что данное землетрясение вызвало образование целого спектра перемещающихся ионосферных возмущений с длинами волн от 200 до 600 км и скоростями от 150 до 2600 м/с. Скорости каждой из мод возмущений в различных направлениях от эпицентра достаточно близки, однако характер распространения разных мод различен и зависит от направления. С помощью метода разнесенного приема SADM-GPS получены карты скоростей перемещения крупномасштабных и среднемасштабных ПИВ.

5. Проведена оценка характеристик (чувствительность, пространственное и временное разрешение, объем получаемой информации, диапазон измерений) наземных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для регистрации и мониторинга возмущений ионосферной плазмы. Разработан проект региональной сети наземных приемников GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири и начато ее развертывание.

6. Разработана методика тестирования алгоритмов GPS-зондирования ионосферы, основанная на моделировании измерений ПЭС и позволяющая проверять достоверность расчетов характеристик ионосферных возмущений, а также решать задачи, связанные с анализом и интерпретацией результатов наблюдений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций

1. Афраймович, Э. Л. Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения / Э. Л. Афраймович, В. В. Кириюшин, **Н. П. Перевалова** // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 7. – С. 822–830.

2. Динамические характеристики перемещающихся волновых пакетов возмущений полного электронного содержания / Э. Л. Афраймович, В. В. Водяников, С. В. Войков, **Н. П. Перевалова**, А. Ф. Яковец // Известия вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. XLV, № 10. – С. 809–827.

3. Детектирование перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения частоты на радиофизическом ком-

плексе ИСЗФ / Э. Л. Афраймович, Ю. Б. Башкуев, О. И. Бернгардт, А. В. Гацуев, М. Г. Дембелов, Б. Г. Шпынев, В. А. Кобзарь, Д. С. Кушнарев, В. Ю. Мусин, П. Ю. Пушкин, **Н. П. Перевалова** // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 463–475.

4. Исследование главного ионосферного провала по данным GPS и ионосферных станций в районе Якутска / Э. Л. Афраймович, О. С. Лесюта, **Н. П. Перевалова**, О. М. Пирог, В. Ф. Смирнов, Э. К. Зикрач, Е. Д. Бондарь // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 2. – С. 215–220.

5. Крупномасштабные возмущения аврорального происхождения во время магнитных бурь 29–31 октября 2003 г. и 7–11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов / Э. Л. Афраймович, С. В. Воейков, **Н. П. Перевалова**, К. Г. Ратовский // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, № 5. – С. 637–642.

6. Влияние суточного вращения Земли на распространение крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере / **Н. П. Перевалова**, Э. Л. Афраймович, С. В. Воейков, И. В. Живетьев // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 12. – С. 1059–1063.

7. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая / Э. Л. Афраймович, С. В. Воейков, А. Б. Ишин, **Н. П. Перевалова**, Ю. Я. Ружин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 703–708.

8. Перевалова, Н. П. Исследование отклика верхней атмосферы на циклоны по данным ионозондов в Восточно-Сибирском и Дальневосточном регионах / **Н. П. Перевалова**, Н. М. Полех // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 09. – С. 882–889.

9. **Перевалова, Н. П.** Эффекты тропических циклонов в ионосфере по данным зондирования сигналами спутниковой радионавигационной системы GPS / **Н. П. Перевалова**, А. Б. Ишин // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 3. – С. 49–61.

10. Исследование волновых возмущений ионосферной плазмы по данным дистанционного зондирования во время урагана Katrina / **Н. П. Перевалова**, А. С. Полякова, А. Б. Ишин, С. В. Воейков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 190–200.

11. Сравнительный анализ вариаций ионосферных и метеорологических параметров над зонами действия тропических циклонов Rita (18–26.09.2005) и Wilma (15–25.10.2005) / **Н. П. Перевалова**, А. С. Полякова, А. Б. Ишин, С. В. Воейков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 303–313.

12. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET / **Н. П. Перевалова**, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкевич, А. Б. Ишин, Е. С. Воейкова, В. А. Саньков // Современные проблемы зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 172–180.

13. Исследование околоземного космического пространства с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ясюкевич, **Н. П. Перевалова**, В. В. Демьянов, И. К. Едемский, А. А. Маркионова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 6 (Спец. вып.). – С. 93–100.

Публикации в журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования и рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций

1. Afraimovich, E. L. GPS direct and inverse radiointerferometry – new methods of investigating travelling ionospheric disturbances / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, **N. P. Perevalova** // *Acta Geod. Geoph. Hung.* – 1997. – Vol. 32, N 3–4. – P. 469–479.
2. Afraimovich, E. L. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, **N. P. Perevalova** // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1998. – Vol. 60, N 12. – P. 1205–1223.
3. Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays / E. L. Afraimovich, E. A. Kosogorov, L. A. Leonovich, K. S. Palamarchouk, **N. P. Perevalova**, O. M. Pirog // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2000. – Vol. 62, N 7. – P. 553–565.
4. Ionospheric effects of the solar eclipse on March 9, 1997, as deduced from the GPS-radio interferometer at Irkutsk / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, **N. P. Perevalova**, V. V. Chernukhov, A. V. Lukhnev, V. T. Zalutsky // *Adv. Space Res.* – 2000. – Vol. 26, N 6. – P. 997–1000.
5. Afraimovich, E. L. Statistical angle-of-arrival and doppler method for GPS interferometry of TIDs / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, **N. P. Perevalova** // *Adv. Space Res.* – 2000. – Vol. 26, N 6. – P. 1001–1004.
6. The use of GPS arrays in detecting the ionospheric response during rocket launchings / E. L. Afraimovich, E. A. Kosogorov, K. S. Palamartchouk, **N. P. Perevalova**, A. V. Plotnikov // *Earth, Planets, and Space.* – 2000. – Vol. 52, N 11. – P. 1061–1066.
7. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes / E. L. Afraimovich, **N. P. Perevalova**, A. V. Plotnikov, A. M. Uralov // *Annales Geophysicae.* – 2001. – Vol. 19, N 4. – P. 395–409.
8. The use of GPS-arrays in detecting shock-acoustic waves generated during rocket launchings / E. L. Afraimovich, E. A. Kosogorov, **N. P. Perevalova**, A. V. Plotnikov // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2001. – Vol. 63, N 18. – P. 1941–1957
9. Afraimovich, E. L. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data / E. L. Afraimovich, **N. P. Perevalova**, S. V. Voeykov // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2003. – Vol. 65, N 11/13. – P. 1245–1262.
10. Large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin according to the data of the GPS network and ionosondes / E.L. Afraimovich, S.V. Voeykov, **N.P. Perevalova**, K.G. Ratovsky // *Adv. Space Res.* – 2008, doi:10.1016/j.asr.2007.11.023.
11. Parameters of large scale TEC disturbances during strong magnetic storm on October 29, 2003 / **N. P. Perevalova**, E. L. Afraimovich, S. V. Voeykov, I. V. Zhivetiev // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – P. A00A13.
12. Statistical study of large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005 / F. Ding, W. Wan, L. Liu, E.L. Afraimovich, S.V. Voeykov, **N. P. Perevalova** // *J. Geophys. Res.* – 2008. – V. 113. – P. A00A01.

13. Perevalova, N. P. Diurnal variations of the total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions / **N. P. Perevalova**, A. S. Polyakova, A. V. Zalizovski // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2010. – Vol. 72, N 13. – P. 997–1007.
14. Polyakova, A. S. Investigation into impact of tropical cyclones on the ionosphere using GPS sounding and NCEP/NCAR Reanalysis data / A. S. Polyakova, **N. P. Perevalova** // Adv. Space Res. – 2011. – Vol. 48. – P. 1196–1210.
15. Polyakova, A. S. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean / A. S. Polyakova, **N. P. Perevalova** // Adv. Space Res. – 2013. – Vol. 52. – P. 1416–1426.
16. Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes / **N. P. Perevalova**, V. A. Sankov, E. I. Astafyeva, A. S. Zhupityaeva // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2014. – Vol. 108. – P. 77–90.

Монографии

1. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, **Н. П. Перевалова**. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСИЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. Афраймович, Э. Л. Детектирование по данным глобальной спутниковой навигационной системы GPS возмущений ионосферной плазмы, обусловленных естественными и техногенными воздействиями / Э. Л. Афраймович, **Н. П. Перевалова** // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Т. I–3. Ионосферная плазма. Ч. 2. – М.: Янус-К, 2009. – С. 126–156.
3. Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович, Г. А. Жеребцов, **Н. П. Перевалова** [и др.]; отв. ред. академик Г.А. Жеребцов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 304 с.

Прочие основные публикации

1. Афраймович, Э. Л. Использование модели GPS-детектирования для определения характеристик ионосферных возмущений / Э. Л. Афраймович, В. В. Кирюшкин, **Н. П. Перевалова** // Труды XX всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород, 2–4 июля 2002 г. – Нижний Новгород, 2002. – С. 104–105.
2. Афраймович, Э. Л. Моделирование измерений полного электронного содержания на GPS-радиоинтерферометре / Э. Л. Афраймович, **Н. П. Перевалова** // Солнечно-земная физика. – 2004. – Вып. 4. – С. 71–78.
3. Relative amplitude of the variations of the total electron content according to the data of the GPS global network / **N. P. Perevalova**, E. L. Afraimovich, I. V. Zhivetiev, E. A. Kosogorov // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 7. – P. GI1007.
4. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи Атлантического побережья США / А. Б. Ишин, С. В. Воейков, **Н. П. Перевалова**, А. В. Зализовский, А. А. Сопин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000», 2009. – Вып. 6, Т. II. – С. 274–279.

5. **Перевалова, Н. П.** Исследование связи ионосферных возмущений в Восточно-сибирском и Дальневосточном регионах с циклонической активностью / **Н. П. Перевалова**, Н. М. Полех, С. В. Воейков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000», 2009. – Вып. 6, Т. II. – С. 287–295.

6. Исследование геодинамических и ионосферных возмущений во время Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. / Г. А. Жеребцов, **Н. П. Перевалова**, Э. И. Астафьева, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкович, В. А. Саньков, А. В. Лухнев, С. В. Ашурков, Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов, Д. Г. Буянова, И. Б. Нагуслаева // Журнал радиоэлектроники. Материалы Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой» (06–10 сентября 2010 г., г. Улан-Удэ). – 2010. – С. 205–219.

7. Ionospheric disturbances generated in auroral zone during magnetic storms / **N. P. Perevalova**, S. V. Voeykov, V. S. Batozskaya, D. S. Trynkova // Physics of Auroral Phenomena: Proceedings of the XXXII Annual Seminar, Apatity, 2–5 March 2010. – Apatity: Print. Kola Science Centre RAS, 2011. – Р. 37–40.

8. **Перевалова, Н. П.** О зондировании ионосферы сигналами GPS и ГЛОНАСС в высоких широтах / **Н. П. Перевалова**, Ю. В. Ясюкович // XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», 23–26 мая 2011 г.: Сб. докл. Т. 1. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – С. 255–258.

9. **Перевалова, Н. П.** Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения / **Н. П. Перевалова** // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 19. – С. 124–133.

10. Отклик ионосферы на Тувинские землетрясения 27 декабря 2011 г. и 26 февраля 2012 г. / **Н. П. Перевалова**, А. С. Жупитяева, С. В. Воейков, Э. И. Астафьева, В. А. Саньков // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Труды XVIII Международного симпозиума. Томск. ИОА СО РАН. [Электронный ресурс]. – Томск, 2012. – С.Д-307–Д-310. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 р.

2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

3. Wilson, B. D. Subdaily northern hemisphere maps using the IGS GPS network / B. D. Wilson, A. J. Mannucci, C. D. Edwards // Radio Science. – 1995. – Vol. 30. – P. 639–648.

4. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.

5. Афраймович, Э. Л. Пространственно-временные характеристики ионосферного возмущения, обусловленного ударно-акустическими волнами, генерируемыми при запусках ракет / Э. Л. Афраймович, В. В. Чернухов, В. В. Кирюшкин // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 11. – С. 1299–1307.

6. Афраймович, Э. Л. Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения / Э. Л. Афраймович, В. В. Кириюшин, Н. П. Перевалова // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 7. – С. 822–830.
7. Войков, С. В. Определение параметров квазиволновых ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01:04:03 / Войков Сергей Викторович. – Иркутск, 2005. – 22 с.
8. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes / E. L. Afraimovich, N. P. Perevalova, A. V. Plotnikov, A. M. Uralov // Ann. Geophys. – 2001. – Vol. 19, N 4. – P. 395–409.
9. Hocke, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982–1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann. Geophys. – 1996. – Vol. 14, N 5. – P. 917–940.
10. Generation of atmospheric gravity waves associated with auroral activity in the polar F region / S. Oyama, M. Ishii, Y. Murayama, H. Shinagawa, S. C. Buchert, R. Fujii, W. Kofman // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106, N A9. – P. 18,543–18,554.
11. Maeda, S. Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric F2-region / S. Maeda, S. Handa // J. Atmos. Terr. Phys. – 1980. – Vol. 42, N 9/10. – P. 853–859.
12. Balthazar, R. L. Morphology of large-scale traveling atmospheric disturbances in the polar thermosphere / R. L. Balthazar, R. J. Moffett // J. Geophys. Res. – 1999. – Vol. 104, N A1. – P. 15–24.
13. Куницын, В. Е. Моделирование распространения акусто-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников / В. Е. Куницын, С. Н. Сураев, Р. Р. Ахмедов // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. – 2007. – № 2. – С. 59–63.
14. Куклин, Г. В. О методике определения периодичностей на примере анализа чисел Вольфа / Г. В. Куклин, И. И. Орлов, О. И. Бернгардт // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 2000. – Вып. 110. – С. 7–12.
15. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока / М. А. Черниговская, Е. А. Шарков, В. И. Куркин, И. И. Орлов, И. В. Покровская // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 6. – С. 17–24.
16. Исследование воздействия тропических циклонов на вариации параметров ионосферы в азиатском регионе России / М. А. Черниговская, В. И. Куркин, И. И. Орлов, Е. А. Шарков, И. В. Покровская // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 120–127.
17. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake / T. Tsugawa, A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, K. T. Murata // Earth, Planets, and Space. – 2011. – Vol. 63, N 7. – P. 875–879.
18. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake / L. M. Rolland, P. Lognonné, E. Astafyeva, E. A. Kherani, N. Kobayashi, M. Mann, H. Munekane // Earth, Planets, and Space. – 2011. – Vol. 63, N 7. – P. 853–857.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН
Заказ № 149 от 19 февраля 2014 г.
Объем 32 с. Тираж 180 экз.