

На правах рукописи



Борчевкина Ольга Павловна

**ЛИДАРНОЕ И СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ВОЗМУЩЕНИЙ ТРОПОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ,
СОЗДАВАЕМЫХ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫМИ
ВОЛНАМИ**

01.04.03 — Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Научный руководитель: Карпов Иван Викторович,
доктор физико-математических наук
Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: Куличков Сергей Николаевич,
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук
заместитель директора по научной работе

Григорьев Геннадий Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет
Физический факультет

Защита состоится 04 апреля 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 2, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/files/2017/787/diss-Borchevkina-787.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



А.В. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование комплекса физических процессов, реализующих связи в различных атмосферных слоях является одной из важнейших задач физики атмосферы. В настоящее время существенный прогресс в развитии экспериментальных исследований верхней атмосферы позволил достоверно установить связь динамических процессов в нижней атмосфере с параметрами крупномасштабных неоднородностей верхней атмосферы и ионосферы. Многочисленные экспериментальные исследования обнаруживают возмущения параметров верхней атмосферы и ионосферы, вызванные развитием сильных метеорологических возмущений, сейсмическими событиями на поверхности, цунами, порождаемыми подводными землетрясениями [1-6]. Экспериментальные исследования показывают, что реакция верхней атмосферы и ионосферы проявляется достаточно быстро, в течение нескольких часов, после возникновения возмущений в нижней атмосфере. Такие особенности проявления реакции верхней атмосферы на динамику нижней атмосферы не получили пока удовлетворительной физической интерпретации.

Наибольший интерес исследователей в изучении связей динамики различных слоев атмосферы привлекают акустико-гравитационные волны (АГВ) и короткомасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ) [7-9]. Согласно [10, 11] метеорологические процессы в нижних слоях влияют на ионосферу преимущественно через распространяющиеся вверх волны, их модификацию и модуляцию. Первые работы по исследованию влияния АГВ на состояние ионосферы появились в 60-70х годах [12-14] и касались описания процессов генерации и распространения внутренних гравитационных волн ВГВ в верхней атмосфере вследствие геомагнитных возмущений. В настоящее время растущий интерес к изучению распространения инфразвуковых волн и АГВ обусловлен попытками привлечения их к объяснению связей нижних и верхних слоев атмосферы.

Наблюдаемые особенности ионосферных проявлений динамики нижней атмосферы, как, например, локализация над областями тропосферных и стратосферных возмущений, а также скорость их возникновения, позволяют существенно сузить частотный диапазон волн, привлекаемых для объяснения. Внимание исследователей в этом случае привлекают АГВ и короткомасштабные ВГВ, способные распространяться практически вертикально

[15-17]. Эффективность волн этого диапазона в формировании крупномасштабных возмущений верхней атмосферы продемонстрирована в теоретических работах [18, 19]. Вместе с тем, в работе [20] показано, что распространение таких волн в верхней атмосфере сопровождается рядом особенностей, связанных с возмущением среды. Таким образом, комплексное исследование АГВ и ВГВ и их воздействие на ионосферу способствует решению актуальной задачи физики атмосферы, связанной с распространением возмущений из нижних слоев атмосферы в ионосферу.

Цели и задачи исследования. Цель диссертационной работы состояла в исследовании акустико-гравитационных волн в атмосфере на основе анализа результатов радиофизических наблюдений с применением методов лидарного и спутникового зондирования атмосферы и ионосферы, с целью изучения ионосферных неоднородностей, вызванных динамическими процессами в нижних слоях атмосферы. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Провести скоординированные наблюдения вариаций атмосферных и ионосферных параметров (интенсивности рассеяния лидарного сигнала, полного электронного содержания (ПЭС), критических частот F2-слоя) методами лидарного и спутникового зондирования в периоды прохождения солнечного терминатора (регулярные возмущения) и метеорологических штормов (нерегулярные возмущения) в Калининградской области.

2. Разработать метод анализа наблюдений, нацеленный на выделение вкладов АГВ и ВГВ в вариации параметров атмосферы и ионосферы. Провести тестирование метода в периоды регулярных и нерегулярных возмущений.

3. Предложить физическую интерпретацию явления возникновения ионосферных возмущений в периоды метеорологических штормов.

Научная новизна. Научная новизна проведенного исследования состоит в комплексном подходе к изучению динамических связей нижних и верхних слоев атмосферы:

1. Разработан метод анализа лидарных наблюдений и данных о ПЭС, позволяющий выделить вклады АГВ и ВГВ и получить временные зависимости их спектральных характеристик.

2. Впервые этим методом получены временные зависимости амплитуд АГВ и ВГВ, возбуждаемых в нижней атмосфере в периоды прохождения

солнечного терминатора и развития метеорологических штормов, в диапазоне периодов от 2 до 20 минут.

3. Впервые в условиях метеорологических штормов выявлены возмущения ионосферы, проявляющиеся в уменьшении значений ПЭС и увеличении амплитуд их вариаций с периодами АГВ.

Теоретическая и практическая значимость. В результате проведенных исследований получены новые сведения о реакции ионосферы на процессы, протекающие в нижней атмосфере. Данные об изменениях характеристик АГВ в рассмотренном частотном диапазоне в условиях метеорологических возмущений имеют значение для задачи параметризации потоков энергии и импульса, переносимых из нижней атмосферы в верхнюю. Кроме того, показано, что прохождение метеорологического шторма сопровождается характерным понижением значений ПЭС. Этот факт необходимо принимать во внимание при использовании данных глобальных навигационных спутниковых систем.

Методы исследования. Наблюдения в нижней атмосфере были выполнены методом лидарного зондирования, позволяющего получать данные о динамике атмосферных параметров на высотах тропосферы. Ионосферные наблюдения были выполнены методом вертикального зондирования ионосферы. Значения ПЭС определялись в результате обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Специально разработанный метод, в основе которого лежит гармонический анализ, позволил выделить вклады АГВ и ВГВ в вариациях наблюдаемых параметров.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Результаты наблюдений интенсивности рассеянного лидарного сигнала в периоды возмущений нижней атмосферы, обусловленных прохождением солнечного терминатора и метеорологическими штормами.

2. Метод анализа атмосферных и ионосферных данных, позволяющий выделить вклады АГВ и ВГВ в вариации наблюдаемых параметров.

3. Экспериментально наблюдаемое (по данным 20 штормов) явление понижения значений критической частоты f_oF2 и ПЭС над областью метеорологического шторма. Понижение составляет до 30% по отношению к метеорологически спокойным дням.

4. Физическая интерпретация наблюдаемых ионосферных возмущений в периоды метеорологических штормов: диссипация АГВ, распространяющихся из области метеорологического возмущения, приводит к локальному разогреву термосферы, влияющему на ионизационно-рекомбинационные процессы в ионосфере и приводящему к понижению электронной концентрации.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность изложенного в диссертации материала подтверждается применением хорошо известных и апробированных экспериментальных и теоретических методов анализа данных. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными и имеющимися представлениями о процессах распространения АГВ и их диссипации в верхней атмосфере.

Апробация результатов. Основные результаты работы были представлены на следующих научных семинарах, симпозиумах и конференциях: II-V International conferences «Atmosphere, ionosphere, safety» (AIS) (г. Зеленоградск, Россия, 2010, 2012, 2014, 2016); European Geosciences Union General Assembly (EGU-2015) (г. Вена, Австрия, 2015); XIV-XV Международные Байкальские молодежные научные школы по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (БШФФ) (г. Иркутск, Россия, 2015, 2017); XXXIX International Seminar «Physics of Auroral Phenomena» (г. Апатиты, Россия, 2016); XII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, Россия, 2016); 13th Annual meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS-2016) (г. Пекин, Китай, 2016); 7th International Conference «Solar-terrestrial relations and physics of earthquake precursors» (п. Паратунка, Россия, 2016); 11-я международная школа-конференция «Проблемы Геокосмоса» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2016); 14-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, Россия, 2016); Международный симпозиум "Атмосферная радиация и динамика" (ISARD-2017) (г. Санкт-Петербург, Россия, 2017); Second VarSITI General Symposium (г. Иркутск, Россия, 2017); The 2017 Joint International Association for the Physical Sciences of the Ocean – International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences International Association of Geomagnetism and Aeronomy Assembly (IAPSO-IAMAS-IAGA) (г. Кейптаун, Южно-Африканская Республика, 2017).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ. Работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК - 3, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, выборе и реализации методов их решения. Лично автором были получены данные по интенсивности рассеянного лидарного сигнала в периоды возмущений нижней атмосферы. Совместно с руководителем был разработан метод анализа атмосферных и ионосферных данных, позволяющий выделить вклады АГВ и ВГВ в вариациях наблюдаемых параметров. Лично автором получены временные зависимости амплитуд АГВ и ВГВ, возбуждаемых в нижней атмосфере в периоды прохождения солнечного терминатора и развития метеорологических штормов, и обнаружено явление понижения значений критической частоты f_oF2 и ПЭС над областью метеорологического шторма. Совместно с руководителем была предложена физическая интерпретация наблюдаемых ионосферных возмущений в периоды метеорологических штормов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, формулировки основных результатов и выводов, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 140 страницах и содержит 52 рисунка, 3 таблицы и библиографию из 183 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертации и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, обосновываются научная ценность и практическая значимость полученных результатов работы, приведено краткое содержание диссертации.

Первая глава представляет собой обзор современных теоретических и экспериментальных исследований о генерации и распространении акустико-гравитационных (АГВ) и короткомасштабных внутренних гравитационных (ВГВ) волн в атмосфере Земли. Показано, что АГВ являются наиболее эффективным механизмом передачи энергии из нижних слоев атмосферы до ионосферных высот, в сравнении с другими типами волн (планетарные, приливы), а также, что распространение АГВ в нейтральной атмосфере и их дис-

сипация на ионосферных высотах могут образовывать ионосферные неоднородности.

Рассмотрены основные источники и механизмы образования АГВ и ВГВ в атмосфере Земли. Особое внимание уделялось таким источникам генерации волновых структур широкого спектрального диапазона как солнечный терминатор (СТ) и метеорологические возмущения. СТ является регулярным, глобальным, пронизывающим всю атмосферную толщу источником возмущений атмосферы. Метеорологические возмущения (штормы) являются климатической особенностью Калининградской области, что позволяет провести комплексное исследование генерации и распространения АГВ и ВГВ, включающее атмосферные и ионосферные наблюдения.

В обзоре экспериментальных методов наблюдений в нижней атмосфере особое внимание уделено методам лидарного зондирования. Большие возможности применения методов лазерного зондирования для мониторинга атмосферы обусловлены возможностью получения данных с высоким пространственным и временным разрешением.

Во **второй главе** представлены результаты наблюдений акустико-гравитационных волн в тропосфере и ионосфере на средних широтах в периоды прохождения солнечного терминатора. Наблюдения в тропосфере выполнены методом лидарного зондирования. Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы определялись по наблюдениям интенсивности рассеянного лидарного сигнала, данные о динамике ионосферы получены по данным наблюдениям сигналов спутников ГНСС, на основе которых определяется ионосферный параметр ПЭС, а также методом вертикального зондирования. В наблюдениях были получены временные ряды наблюдений ПЭС и интенсивности рассеянного лидарного сигнала.

В настоящее время в исследованиях атмосферы получили широкое распространение активные методы зондирования, в частности, лидарное зондирование, для изучения характеристик атмосферных параметров. Распространяясь по атмосферной трассе зондирования, лазерный импульс испытывает поглощение и рассеивание на молекулах и аэрозолях атмосферы. Интенсивность принятого на лидаре рассеянного сигнала в каждый конкретный момент времени зависит как от свойств конкретного рассеивающего объема атмосферы, так и от характеристик всей атмосферной трассы зондирования на двойном пути от лидара до рассеивающего объема и обратно. Наблюдения вариаций параметров нижней атмосферы осуществлены с применением ат-

мосферного лидара LSA-2с, излучающего на длинах волн 532 и 1064 нм. В п. 2.1 – 2.2 изложена разработанная методика обработки результатов лидарного зондирования для определения частотных характеристик вариаций параметров нижней атмосферы. Методика основана на методах спектрального анализа применяемых к наблюдениям интенсивности рассеянного лидарного сигнала. Применяемая методика анализа результатов наблюдений реализована в виде программы для ЭВМ «E-LIS» (Программа обработки результатов лидарного зондирования нижней атмосферы и получения спектральных характеристик рассеянного лидарного сигнала. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616204, 8 июня 2016 г.)

Для анализа частотных характеристик вариаций атмосферных и ионосферных параметров были выбраны наблюдения в период прохождения солнечного терминатора. На рис. 1 а, б представлены спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала на длинах волн 1064 и 532 нм на разных высотах в наблюдениях, выполненных в 2012 году в период прохождения вечернего СТ над Калининградом (54° с.ш. 20° в.д.). В анализе наблюдений основное внимание уделялось выделению вариаций с периодами от 2 до 20 минут, обусловленных распространением инфразвуковых и короткомасштабных внутренних гравитационных волн.

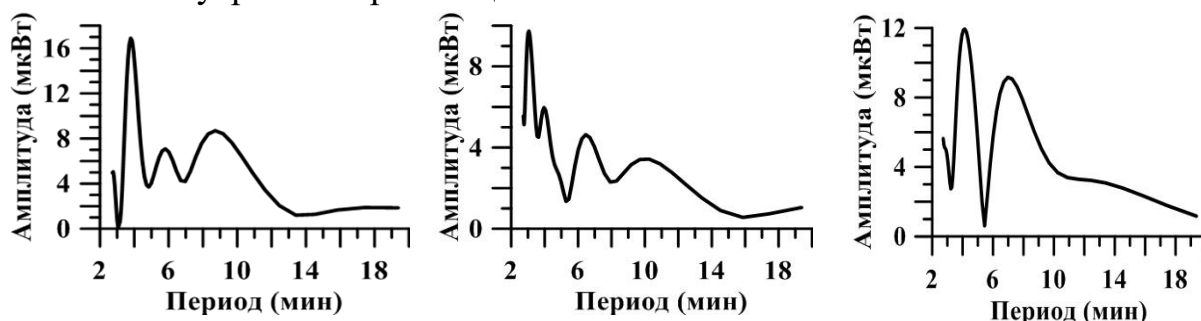


Рис. 1а. Спектр вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на канале 1064 нм 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо)

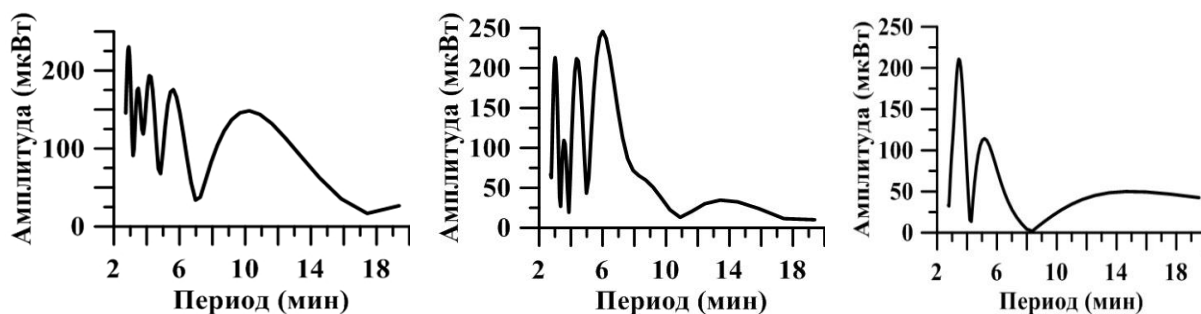


Рис. 1б. Спектр вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на канале 532 нм 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо)

В наблюдениях отчетливо проявляется осцилляционный характер изменений характеристик рассеянного лидарного сигнала в предвосходной области в тропосфере. В рассмотренный период отмечено, что такие осцилляции наблюдаются за полчаса - час до восхода Солнца. Можно предположить, что в области СТ формируются волновые структуры с выявленными периодами, распространение которых приводит к изменению характеристик вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала. Результаты анализа спектров показали, что наиболее важный вклад в вариации лидарного сигнала вносят гармоники с периодами 2-10 мин. Как видно из **рис. 1 а, б** прохождение СТ сопровождается усилением амплитуд вариаций АГВ (менее 4 минут) и ВГВ с периодами близкими к периоду Вейсяля-Брента (6-10 минут).

Для исследования вкладов изучаемых гармоник в период наблюдений рассматривалась динамика изменения во времени спектров вариаций. Для решения этой задачи использовалось оконное преобразование Фурье, суть которого заключается в проведении спектрального анализа внутри скользящего окна заданного размера (длительности). Полученный таким образом спектр является функцией времени. В анализе проведенных наблюдений применялось прямоугольное окно с продолжительностью 20-40 минут, что позволяло выделять вклады акустических волн и коротких ВГВ. На **рис. 2** показаны изменения спектров лидарных сигналов в диапазоне 2-30 мин на высотах 5 и 10 км.

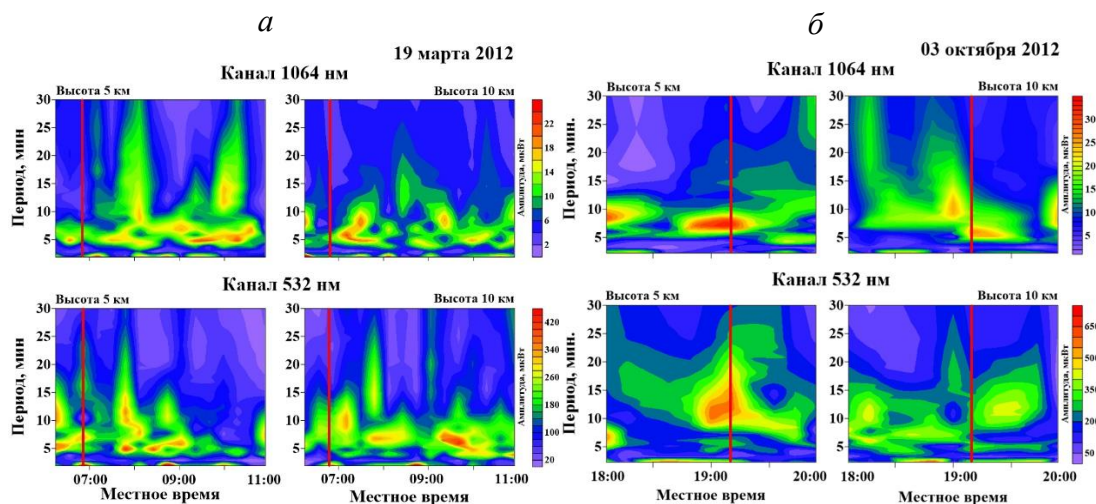


Рис. 2. Спектр вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала в период прохождения СТ 19.03.2012 (а) и 03.10.2012 (б).

Анализ наблюдений показал, что в спектре вариаций атмосферных и ионосферных параметров присутствуют гармоники с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ. Усиление волновой активности в рассматриваемом частотном диапазоне отчетливо проявляется в периоды прохождения СТ.

В период с 2011 по 2016 год было выполнено 15 серий наблюдений для определения вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала в разные сезоны года. Во всех наблюдениях нижней атмосферы прохождение СТ над пунктом наблюдения сопровождается изменением амплитуд вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала с периодами 2-4 минуты и 6-10. Наблюдения также обнаруживают резкое понижение амплитуд гармоник с периодами 3-5 мин в течение всего периода наблюдений. Можно предположить, что такая особенность спектра вариаций обусловлена различием частот Вьясяля-Брента и акустического обрезания и позволяет разделить акустические и внутренние гравитационные волны, возбуждаемые в области терминатора. В тоже время отчетливо видна разница между утренним и вечерним СТ. Характерной особенностью наблюдаемых АГВ и ВГВ на утреннем и вечернем сеансах является наличие небольшого временного запаздывания после прохождения СТ и усиление волновой активности.

В п. 2.3. проводится анализ результатов ионосферных наблюдений. Регулярность возмущений, создаваемых СТ позволяет тестировать развиваемые методики анализа наблюдений с целью выделения вкладов АГВ и короткомасштабных ВГВ. Частотные характеристики вариаций параметров ионосферы определялись по ионосферному параметру ПЭС.

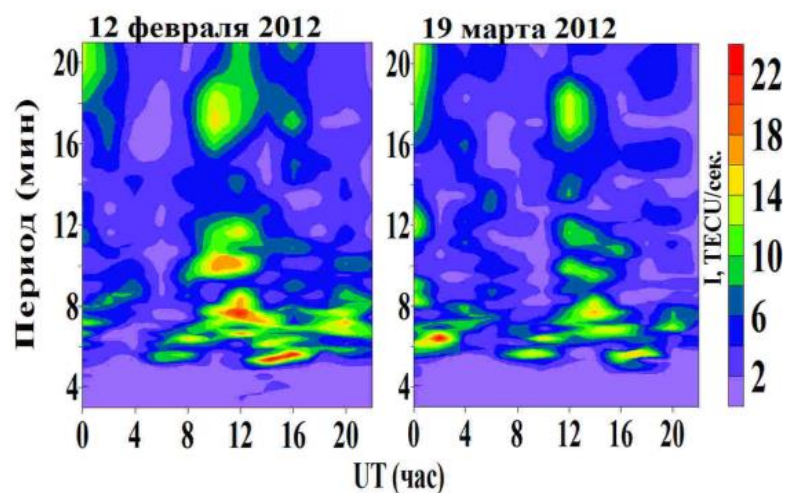


Рис. 3. Изменение спектра вариаций ПЭС с периодами 2-20 мин в течение суток

Данные о суточных вариациях ПЭС позволяют определить динамику изменений высокочастотной составляющей спектра в течение суток. На **рис. 3** представлен спектральный анализ суточных вариаций ПЭС выполненный по наблюдениям в Калининграде. Анализ наблюдений показал, что в спектре ва-

риаций ПЭС наблюдается изменение амплитудных составляющих в области утреннего и вечернего терминатора, в том числе отмечалось повышение амплитуд гармоник с периодами 5-7 мин. На **рис. 3** отчетливо прослеживается область утреннего и вечернего терминаторов и смещение этих областей, связанное с изменением времени прохождения СТ в ионосфере. Из рисунка видно, что гармоники с периодами ~ 5 мин. наблюдаются только утром и вечером. Гармоники с большими периодами наблюдаются в течение всего дневного времени.

Для выявления вкладов АГВ и короткомасштабных ВГВ по наблюдениям навигационных спутников предложена более точная процедура определения частотных характеристик вариаций ПЭС и временного диапазона их появления в точке наблюдения. Спектральные характеристики вариаций ПЭС определяются по наблюдениям сигналов отдельных спутников. Для анализа структуры вариаций ионосферы рассматривалось изменение со временем спектра вариаций производной по времени от величины ПЭС, полученной в наблюдениях сигналов отдельных спутников GPS. Эта процедура позволяет выделить высокочастотные составляющие вариаций ПЭС и удалить низкочастотные вклады определяемые изменением положения спутника относительно станции наблюдения.

Для определения временной изменчивости спектров в процессе наблюдений применяется процедуры оконного преобразования Фурье, аналогичные применявшимся при анализе лидарных наблюдений. Разработанная процедура анализа частотных вариаций ПЭС реализована в виде программы для ЭВМ «DSTEC» (Программа расчета изменения спектра вариаций параметров ионосферы в течение наблюдений сигналов отдельных спутников глобальных навигационных систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617118, 27 июня 2016 г.). На **рис. 4** показаны спектры вариаций ПЭС над среднеширотной станцией Калининград (54° с.ш. 20° в.д.). Наблюдения выполнены по наблюдениям отдельных спутников GPS в период прохождения утреннего и вечернего СТ. Отметим увеличение амплитуд гармоник в вариациях ПЭС с периодами 6-8 и 14–18 мин в освещенной области ионосферы после прохождения утреннего и перед прохождением вечернего СТ в ионосфере. Продолжительность усиления волновой активности в этих частотных диапазонах составляет ~ 1 –2 ч. Учитывая локализацию гармоник с периодами 5-8 минут в области СТ как на ионосферных

высотах, так и в нижней атмосфере, можно предположить, что причиной этих вариаций являются источники АГВ в нижней атмосфере.

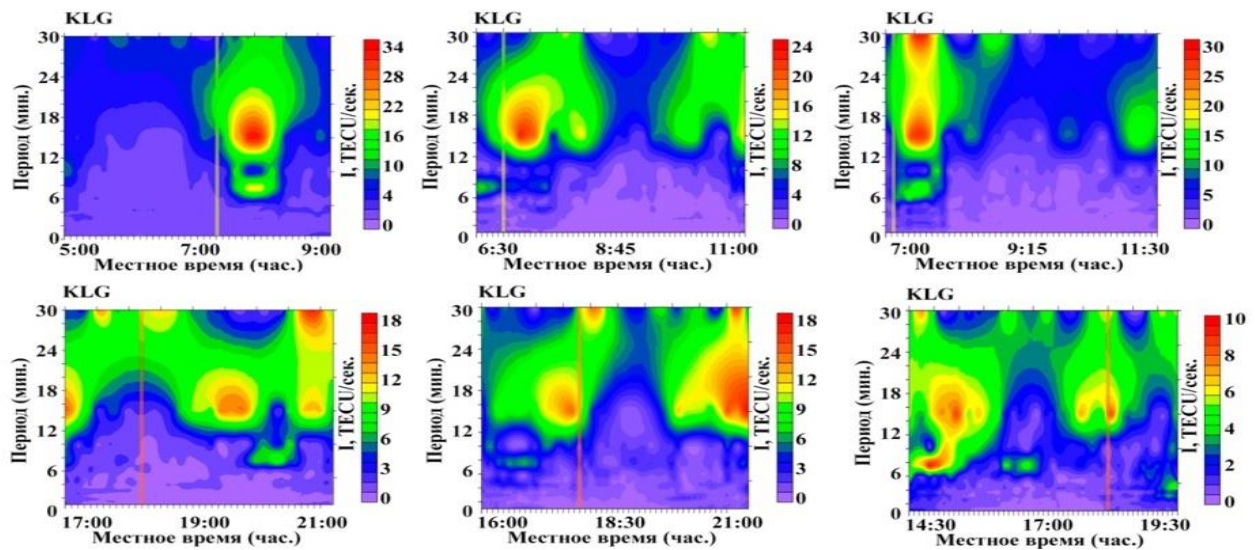


Рис. 4. Спектры вариаций ПЭС по наблюдениям отдельных спутников над Калининградом 01.03.2010 г.

Как видно из **рис. 4** в период прохождения утреннего СТ отмечается усиление гармоник с периодами ВГВ близкими к периоду Вайсяля-Брента в F-области ионосферы (16-18 минут), а также гармоник с периодами АГВ (6 - 8 минут). Продолжительность этого усиления составляет $\sim 1.5 - 2$ часа для ВГВ и ~ 0.5 часа для АГВ. При прохождении вечернего СТ также отмечается усиление вкладов гармоник с периодами короткомасштабных ВГВ непосредственно перед прохождением СТ и через час-полтора после его прохождения. Появление колебаний с периодами АГВ носит нерегулярный характер, что, по-видимому, связано с положением спутника относительно станции приема сигналов.

Результаты анализа наблюдений вариаций ПЭС вдоль пролетов спутников подтверждают существование вариаций с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ в области СТ. Различия в динамике этих вариаций на утреннем и вечернем терминаторе, по-видимому, связаны с различиями в состоянии атмосферы и термосферы в периоды утреннего нагрева и вечернего охлаждения и условиями распространения АГВ и ВГВ из нижних слоев атмосферы. Наблюдаемая задержка по времени в появлении вариаций с периодами АГВ в ионосфере составляет $\sim 15-30$ минут, что позволяет предположить, что эти волны возбуждаются в нижней атмосфере, а не на высотах верхней атмосферы и ионосферы. Отсутствие этих колебаний в ночное время

может быть связано с особенностью распространения АГВ в верхней атмосфере. Так в [21] показано, что для акустико-гравитационных волн с периодами меньше периода Вайсяля-Брента в верхней атмосфере возможно волновое распространение. Причем высота верхней границы волновода определяется высотой области диссипации АГВ (200-250 километров). Это означает, что в ночных условиях ионосферный слой лежит значительно выше волновода акустико-гравитационных волн (300-400 километров). Следовательно, в наблюдениях сигналов спутников на ночной стороне АГВ в волноводе не будут оказывать влияние на прохождение сигналов. На дневной стороне ионосфера будет располагаться на высотах 200-250 километров, то есть непосредственно в области волновода акустико-гравитационных волн. Это и обеспечит возможность наблюдения АГВ в дневных условиях. Следовательно, возможной причиной асимметрии в появлении вариаций ПЭС с периодами АГВ является изменение высоты ионосферного слоя в течение суток и существование атмосферного волновода для АГВ.

В п. 2.4. проведено исследование солнечного затмения методами лидарного и спутникового зондирования. Частичное солнечное затмение 20.03.2015 г. над Калининградом продолжалось с 10.49 до 13.00 местного времени. Наблюдения в нижней атмосфере проводились методом лидарного зондирования. В наблюдениях определялось изменение со временем интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала, отражающее частотные характеристики вариаций параметров атмосферы на различных высотах в области наблюдений. Для анализа частотных характеристик вариаций наблюдаемых параметров применялись те же методики, что и для исследования СТ. На **рис. 5** показано изменение со временем спектра вариаций рассеянного лидарного сигнала в период затмения.

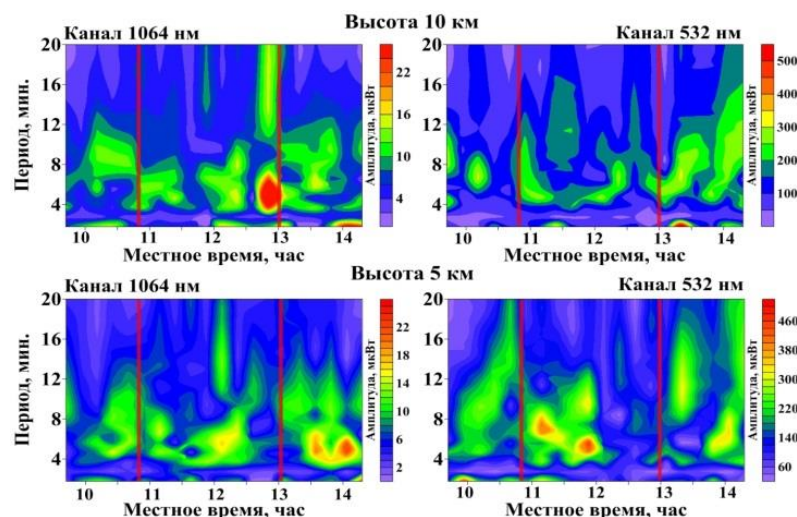


Рис. 5. Изменение во времени спектра вариаций рассеянного лидарного сигнала в период солнечного затмения 20 марта 2015 г.

В нижней атмосфере отчетливо проявляется область вариаций с периодами 3-5 мин, амплитуды которых остаются наименьшими в сравнении с амплитудами вариаций с меньшими и большими периодами. По результатам анализа наблюдений на высоте 5 км перед началом солнечного затмения (10 час. 50 мин.) в изучаемом спектральном диапазоне вариаций атмосферы основной вклад вносили гармоники с периодами $\sim 6-10$ мин, соответствующие ВГВ, и АГВ составляющие с периодами $\sim 2-4$ мин. Непосредственно перед началом затмения отмечается уменьшение амплитуд всех составляющих вариаций. На начальной фазе затмения увеличились амплитуды с периодами АГВ и гармоник с периодом ~ 6 мин. Эти гармоники вносили основной вклад в вариациях атмосферы в рассмотренном частотном диапазоне в продолжение начальной и главной фазы затмения. В заключительной фазе затмения их амплитуды уменьшились. Амплитуды гармоник с периодами ВГВ 8-10 минут возрастали на начальной и заключительной фазах затмения и уменьшались при прохождении главной фазы. Перед окончанием затмения, также как и перед началом, отмечается уменьшение амплитуд всех гармоник и их резкое повышение через ~ 0.5 час после окончания затмения. Схожие изменения спектров атмосферных вариаций отмечаются и на высоте 10 км. Можно отметить, что изменения амплитуд гармоник с периодами ВГВ $\sim 8-12$ мин перед началом и окончанием затмения начинаются раньше, чем изменения амплитуд гармоник с периодами АГВ. Существенные изменения вариаций параметров атмосферы и ионосферы с периодами ВГВ отмечаются только в начальной и заключительной фазах затмения. В течение главной фазы затме-

ния основной вклад в вариации параметров среды вносят гармоники с периодами АГВ.

Результаты анализа структуры вариаций ионосферного параметра ПЭС в период солнечного затмения, полученные по наблюдениям сигналов отдельных спутников GPS, показаны на **рис. 6**.

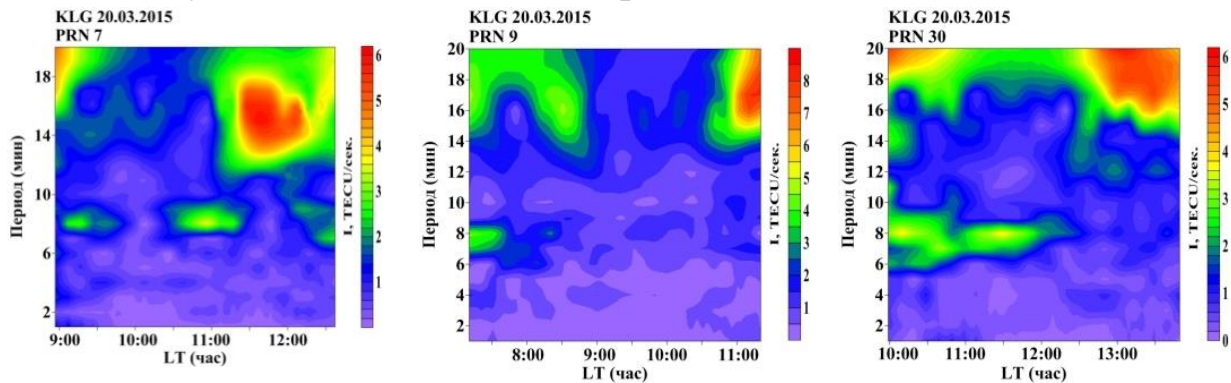


Рис. 6. Изменение во времени спектра вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS на ст. Калининград в период солнечного затмения 20 марта 2015.

Как видно из **рис. 6**, перед затмением в спектре вариаций ПЭС в исследуемом частотном диапазоне основной вклад вносили гармоники с периодами 6-8 мин и 16-18 мин. Перед началом затмения отмечается повышение амплитуд гармоник с периодами ~ 16-18 мин. Однако после начала затмения их амплитуды быстро снижаются и остаются низкими в течение всего затмения. Амплитуды гармоник с периодами 6-8 мин несколько уменьшаются с началом затмения. Продолжительность этого уменьшения составляет ~ 0.5 час. В дальнейшем амплитуды этих гармоник возрастают, достигают максимума во время главной фазы затмения и уменьшаются перед его окончанием. После окончания затмения отмечается быстрый рост амплитуд гармоник с периодами 16-18 мин.

Наблюдения атмосферных и ионосферных параметров показали (**рис. 5, 6**), что в нижней атмосфере и ионосфере в диапазоне периодов 2-20 мин. прохождение солнечного затмения оказывает существенное влияние на вариации параметров среды с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ.

В п. 3.1 представлены результаты исследования сильных метеорологических штормов, произошедших в Калининградской области в 2008-2016 годах, и их влияние на ионосферные параметры. Метеорологические процессы являются важным источником АГВ в атмосфере. Для исследования ионосферной динамики в условиях метеорологических возмущений были выбра-

ны периоды, в течение которых отмечались наиболее сильные метеорологические шторма на территории Калининградской области. Все рассмотренные шторма оцениваются по шкале Бофорта в 6 баллов и выше. Для исключения влияния факторов, не связанных с метеорологическими возмущениями, отбирались события, которые развивались на фоне спокойных геомагнитных и солнечных условий. В качестве атмосферных параметров, связанных с возмущением метеорологической обстановки, рассматривались приземное атмосферное давление и амплитуда порывов ветра. Характеристики вариаций ионосферы определялись по наблюдениям критической частоты $F2$ -слоя ($foF2$) и полного электронного содержания. Результаты показывают, что в период прохождения метеорологических штормов отмечается понижение значений критической частоты $F2$ -слоя, достигающие до 30% по сравнению с метеорологически спокойными днями. В вариациях ПЭС в дни метеорологического возмущения также отмечается понижение значений, отчетливо проявляющееся в дневных условиях и достигающее до 50% в сравнении с метеоспокойными днями.

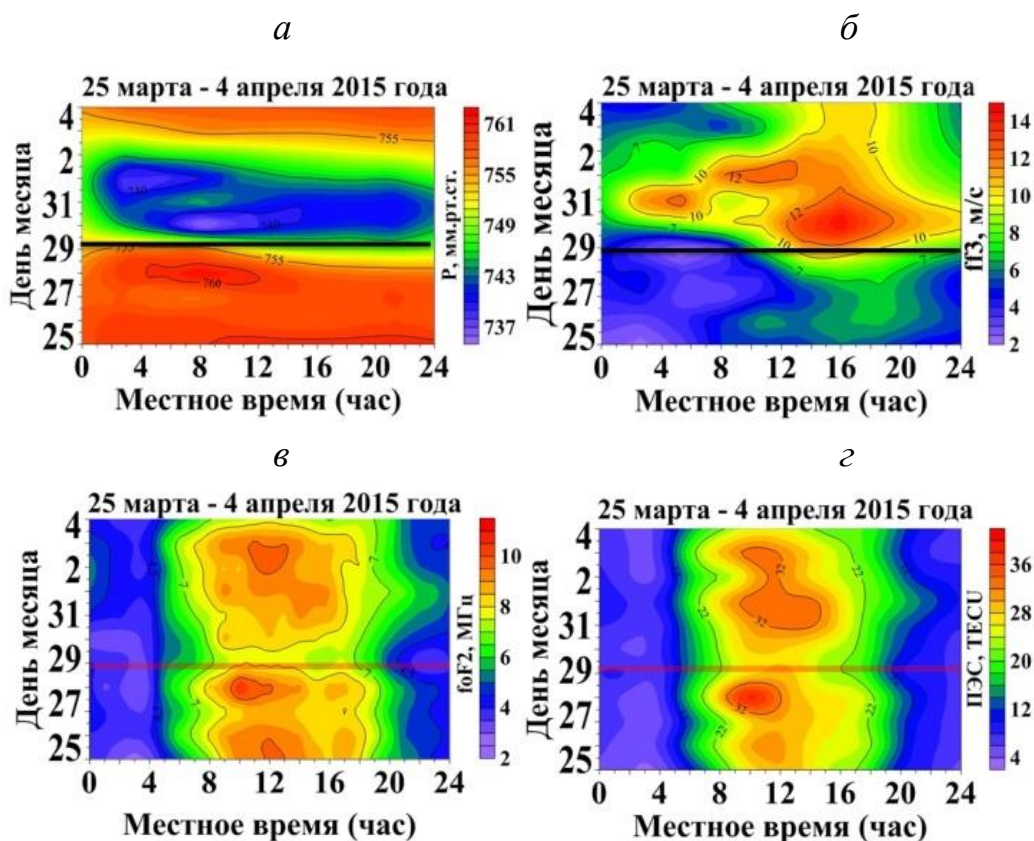


Рис. 7. Суточные вариации давления (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации $foF2$ (в); суточные вариации ПЭС (г) 25 марта – 4 апреля 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград.

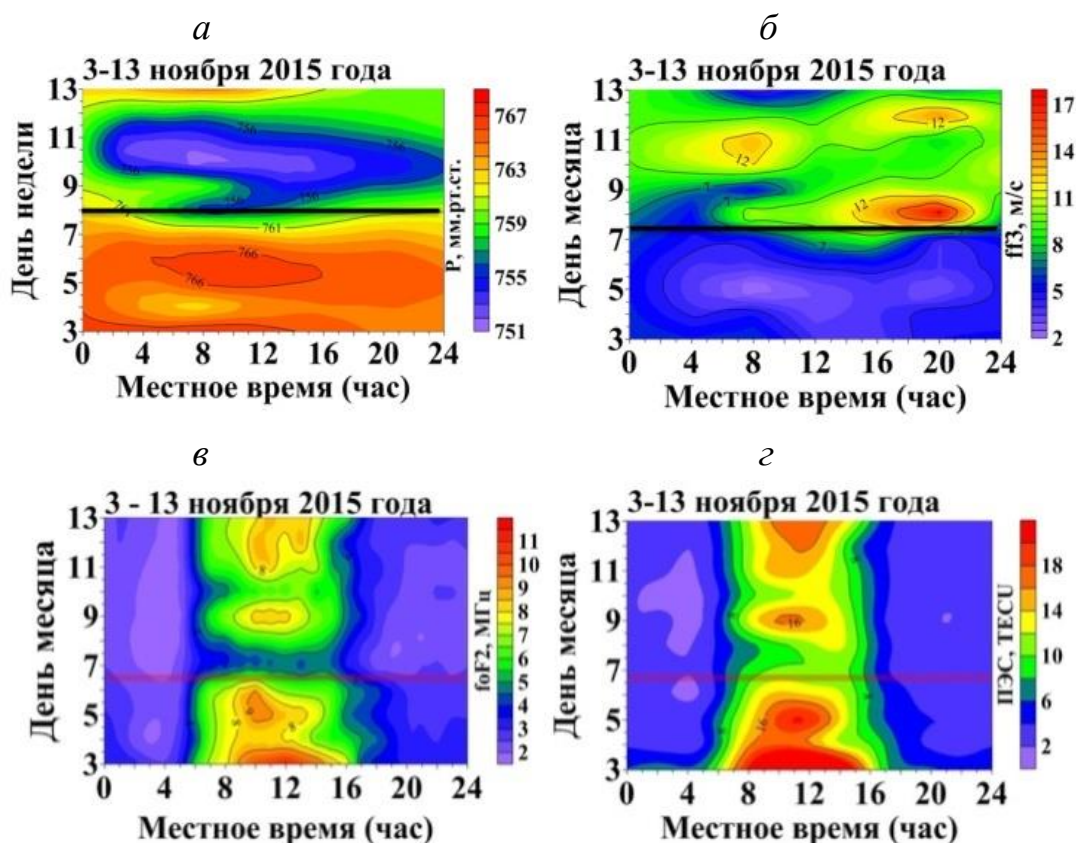


Рис. 8. Суточные вариации давления (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации $foF2$ (в); суточные вариации ПЭС (г) 3 – 13 ноября 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград.

По наблюдениям в Калининградском регионе в 2010 – 2015 г. в периоды метеорологических штормов, развивающихся на фоне спокойных солнечных и геомагнитных условий, были рассмотрены ионосферные возмущения для 15 событий и во всех случаях ионосферная реакция проявлялась в понижении значений критических частот и ПЭС. Такая реакция ионосферы проявляется достаточно быстро, в течение 3-6 часов после начала метеорологических штормов, и продолжается в течение практически всего периода наблюдений в возмущенные сутки.

Такая реакция ионосферы проявляется достаточно быстро, в течение 3-6 часов после начала метеорологических штормов, и продолжается в течение практически всего периода наблюдений в возмущенные сутки

Таким образом, естественно предположить, что наиболее вероятным источником, определяющим скорость возникновения ионосферных возму-

щений, являются АГВ, возбуждаемые в области метеорологического возмущения.

В п. 3.2 представлены результаты теоретического исследования процессов распространения АГВ из нижней атмосферы, выполненного с применением численной модели, учитывающей нелинейные и диссипативные процессы, сопровождающие распространение волн [20]. На рис. 9 представлены результаты моделирования влияния распространения АГВ от наземного источника.

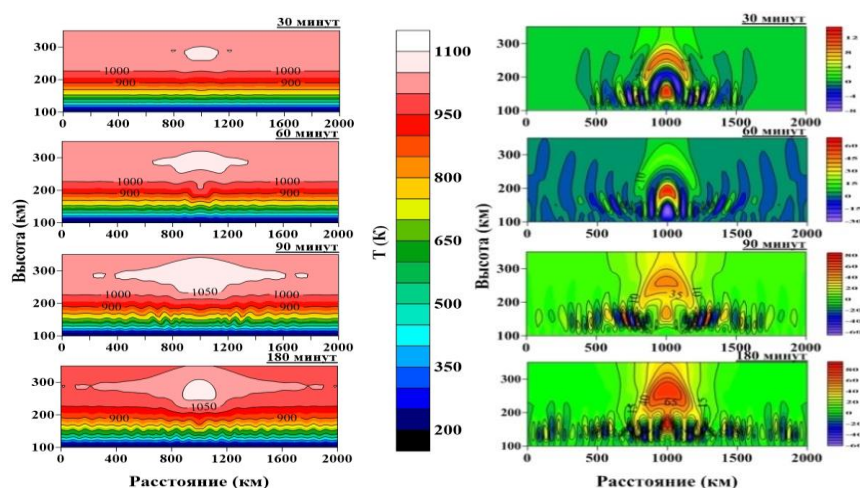


Рис. 9. Средняя температура (слева) и волновые возмущения температуры (справа) в верхней атмосфере от наземного источника АГВ.

Как видно из рис. 9, возмущения в верхней атмосфере возникают через 30 минут после начала работы источника. Диссипация АГВ, распространяющихся из нижней атмосферы приводит в термосфере к формированию областей повышенной температуры, локализованных над источником АГВ. Согласно расчетам [21] при длительности работы источника в нижней атмосфере ~ 1 час в термосфере на высотах ~ 200 км возникает область повышенной температуры с пространственным масштабом в сотни километров, а время релаксации таких возмущений после окончания работы источника составляет несколько часов. Теоретические представления об эффектах диссипации АГВ, распространяющихся из области метеорологических возмущений, в верхней атмосфере качественно вполне согласуются с наблюдаемыми изменениями состояния ионосферы. Области повышенного нагрева в термосфере будут влиять на ионизационно-рекомбинационные процессы, что, в конечном итоге, приведет к уменьшению ПЭС и критической частоты F2-слоя ионосферы, а длительная релаксация этих областей обеспечит продолжительность существования ионосферных неоднородностей.

Исследование вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы во время метеорологического возмущения представлены в п.3.3. Для определения частотных характеристик вариаций параметров ионосферы была использована методика, подробно описанная в главе 2. Результаты анализа на примере рассмотрения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 показаны на **рис. 10**. На рисунках показаны спектры вариаций ПЭС полученные по наблюдениям отдельных спутников GPS наблюдавших на станции Калининград в течение 5 дней (включая день метеорологического шторма) в одно и то же местное время (утро, день, вечер). Период обращения спутников GPS равен ~ 12 часам, поэтому в каждый из дней отдельно выбранный спутник появлялся над точкой наблюдения практически в одно и то же время.

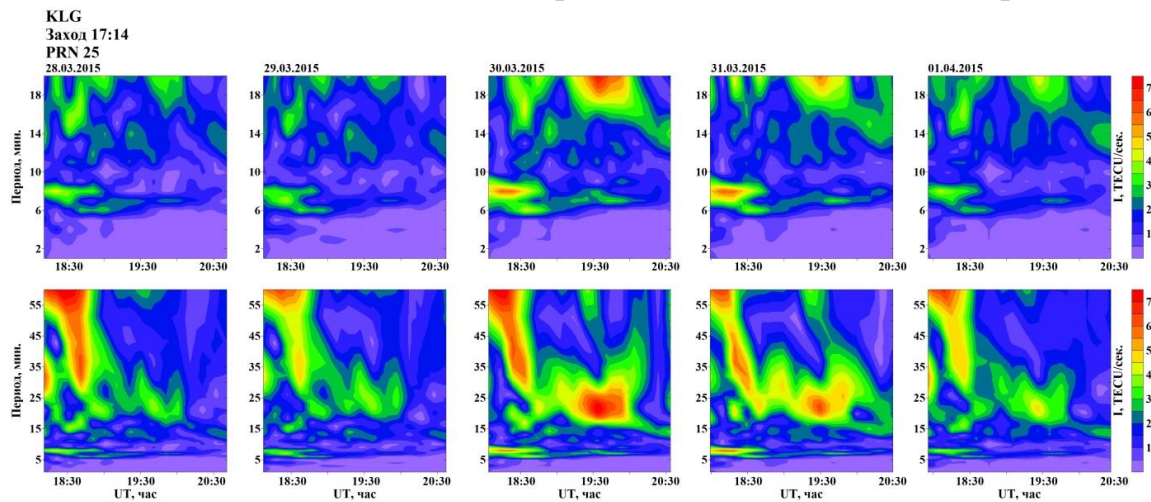


Рис. 10. Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS с 18:00 до 21:00 местного времени на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 г.

Для наглядности, вариации спектральные характеристики вариаций ПЭС строились в двух частотных диапазонах. В диапазоне с периодами до 20 минут определялся вклад составляющих АГВ, а в диапазоне до 60 минут вклад АГВ и короткомасштабных ВГВ. В наблюдениях частотных характеристик вариаций ПЭС отмечается существенное усиление амплитуд гармоник с периодами 20-25 минут с максимумом в день метеорологического шторма. Возмущения вариаций ПЭС в этом частотном диапазоне сохраняются в течение следующих суток. Ширина спектра возмущений в диапазоне АГВ и ВГВ, инициируемых метеорологическими штормами, составляет от 10 до 60 минут и амплитуды вариаций соответствующих гармоник устойчиво коррелируют с динамикой метеорологического возмущения. На основе теоретических исследований и данных наблюдений можно предположить, что

наблюдаемые продолжительные понижения значений ПЭС в периоды метеорологических штормов можно объяснить процессами формирования локальных областей нагрева термосферы вследствие диссипации АГВ, приходящих в верхнюю атмосферу из области метеорологического возмущения в нижней атмосфере.

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

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Laštovichka, J. Forcing of the ionosphere by waves from below / J. Laštovichka // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2006. — V. 68, No. 3–5. — P. 479—497.
2. Антонова, В.П. Различие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленное неравновесными эффектами в атмосфере. / В.П. Антонова, К.Е. Дунгенбаева, А.В. Зализовский, А.С. Инчин, С.В. Крюков, В.М. Сомсиков, Ю.М. Ямпольский // *Геомагнетизм и аэронавигация*. — 2006. — Т.46, № 1. — С.106—114.
3. Hocke, K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995 / K. Hocke, K. Schlegel // *Ann. Geophys.* — 1996. — V. 14. — P. 917—940.
4. Перцев, Н.Н. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу / Н.Н. Перцев, С.Л. Шалимов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. — 1996. — Т. 36. — С. 111—118.
5. Fritts, D.C. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere / D.C. Fritts, M.J. Alexander // *Rev. Geophys.* — 2003. — V. 41, No. 1. — P. 1—64.
6. Yiğit, E. A review of vertical coupling in the Atmosphere-Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity / E. Yiğit, P. Koucká Knížová, K. Georgieva, W. Ward // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016. — V. 141. — P. 1—12.
7. Чунчузов, И.П. Акустическое исследование мезомасштабных флуктуаций скорости ветра в устойчивом пограничном слое атмосферы / И.П. Чунчузов, С.Н. Куличков, А.И. Отрезов, В.Г. Перепелкин, М.А. Каллистратова, В.Н. Товчигренко, Е.Н. Кадыгров, Р.Д. Кузнецов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 761—782.
8. Григорьев, Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) / Г.И. Григорьев // *Изв. вузов. Радиофизика*. — 1999. — Т. 42, № 1. — С. 3—24.

9. Blanc, E. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in Western Africa. / E. Blanc, T. Farges, A. Le Pichon, P. Heinrich // *Journal of Geophysical Research*. — 2014. V. 119, Iss. 11. — P. 6409—6418.
10. Голицын, Г.С. Динамика природных явлений: климат, планетные атмосферы, конвекция / Г.С. Голицын. — Москва: Физматлит, 2004. — 344 с.
11. Kazimirovsky, E., M. Herraiz, and A. D. L. B. Morena (2003), Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it, *Surv. Geophys.*, 24, 139—184.;
12. Hines, C. O. Internal atmospheric waves at ionospheric heights. / C. O. Hines // *Can. J. Phys.* — 1960. — V. 38. — P. 1440—1479.
13. Francis, S.H. A theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances / S.H. Francis // *Journal of Geophysical research*. — 1974. — V. 79, No. 34. — P. 5245—5260.
14. Гершман, Б.Н. Перемещающиеся ионосферные возмущения (Обзор) / Б.Н. Гершман, Г.И. Григорьев // *Известия Вузов. Радиофизика*. — 1968. — Т. 11, № 1. — С. 5-27.
15. Крючков, Е.И. Особенности переноса энергии в атмосфере акустико-гравитационными волнами / Е.И. Крючков, А.К. Федоренко // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2012. — Т. 52, № 2. — С. 251-257.
16. Artru, J. Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling / J. Artru, T. Farges, P. Lognonné // *Geophysical Journal International*. — 2004. — V. 158. — P. 1067—1077.
17. Sauli, P. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere / P. Sauli, J. Boska // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2001. — V. 63. — P. 945—950.
18. Куницын, В.Е. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников / В.Е. Куницын, С.Н. Сураев, Р.Р. Ахмедов // *Вестник Московского университета, серия 3, Физика. Астрономия*. — 2007. — № 2. — С. 59-63.
19. Vadas, S. L. Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity / S. L. Vadas, D. C. Fritts // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — V. 110. — P. D15103.
20. Kshevetskii, S.P. Numerical symulation of nonlinear internal gravity waves / S.P. Kshevetskii // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2001. — V. 41, No. 12. — P. 1777-1791.
21. Карпов, И.В. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли / И.В. Карпов, С.П. Кшевецкий // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2014. — Т. 54, № 4. — С. 553—562.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика анализа данных, полученных по наблюдениям полного электронного содержания в ионосфере и рассеянного в тропосфере лидарного сигнала, позволяющая выделить вклады акустико-гравитационных (АГВ) и внутренних гравитационных (ВГВ) волн в вариациях наблюдаемых параметров.

2. Показано, что в периоды сильных метеорологических возмущений наблюдается уменьшение значений критических частот F-слоя и полного электронного содержания. При этом в спектре вариаций параметров атмосферы и ионосферы отмечается увеличение (по отношению к метеорологически спокойным дням) амплитуд гармоник с периодами АГВ и ВГВ.

3. Из анализа наблюдений и по результатам математического моделирования процессов распространения АГВ от источников в нижней атмосфере предложена физическая интерпретация возникновения ионосферных возмущений в периоды развития метеорологических штормов. Процессы диссипации АГВ, распространяющихся из области возмущений в нижней атмосфере, приводят к формированию локализованных областей повышенного разогрева термосферы, влияющих на ионизационно-рекомбинационные процессы в ионосфере.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Суслова, О.П.** Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы и ионосферы в периоды прохождения солнечного терминатора / **О.П. Суслова**, И.В. Карпов, А.В. Радиевский // Химическая физика. — 2013. — Т.32, №9. — С.77- 81.
2. Карпов, И.В. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере / И.В. Карпов, С.П. Кшевецкий, **О.П. Борчевкина**, А.В. Радиевский, А.И. Карпов // Химическая физика. — 2016. — Т. 35, № 1. — С. 59-64.
3. **Борчевкина, О.П.** Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений / **О.П. Борчевкина**, И.В. Карпов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2017. — Т.57, №5. — С.670-675.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

1. **Борчевкина О.П.**, Карпов И.В., Карпов А.И. Программа обработки результатов лидарного зондирования нижней атмосферы и получения спектральных характеристик рассеянного лидарного сигнала «E-LIS». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616204, 8 июня 2016 г.
2. Карпов А.И., Карпов И.В., **Борчевкина О.П.** Программа расчета изменения спектра вариаций параметров ионосферы в течение наблюдений сигналов отдельных спутников глобальных навигационных систем «DSTEC». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617118, 27 июня 2016 г.

Публикации в других изданиях:

1. Карпов, И.В. Динамика приземного аэрозоля по лидарным наблюдениям в Калининграде / И.В. Карпов, Ф.С. Бессараб, А.В. Радиевский, **О.П. Суслова** // Вестник БФУ им. И.Канта: Вестник БФУ им. И.Канта: серия физико-математические науки. — 2012. — Вып.4. — С. 73-77.
2. Карпов, И.В. Исследование вариаций параметров атмосферы и ионосферы с периодами акустико-гравитационных волн в Калининграде / И.В. Карпов, **О.П. Борчевкина**, Р.З. Дадашев, А.И. Карпов, А.В. Ильминская, А.В. Радиевский // Труды XIV конференции молодых ученых «Взаим-

модель взаимодействия полей и излучения с веществом» БШФФ-2015. — Иркутск, 2015. — С. 102-105.

3. Карпов, И.В. Влияние метеорологических штормов на параметры ионосферы в Балтийском регионе В 2010 г. / И.В. Карпов, **О.П. Борчевкина**, Р.З. Дадашев, А.В. Ильминская // Солнечно-земная физика. — 2016. — Т. 2, № 2. — С. 64-68.

4. **Борчевкина, О.П.** Влияние метеорологических штормов на параметры атмосферы и ионосферы в Калининградской области в 2016 году / О.П. Борчевкина, И.В. Карпов, А.В. Ильминская // Метеорологический вестник. — 2016. — Т. 8, № 3 — С. 30-38.

5. Karpov, I. Disturbances in the upper atmosphere and Ionosphere from the sources on the Earth surface / I. Karpov, S. Kshevetskii, **O. Borchevkina**, A. Radievsky, A. Karpov // Proceedings of IV International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety. — Kaliningrad, 2014. — P. 23–27.

6. Karpov, I.V. Acoustic- gravity waves in the observations of tropospheric and ionospheric parameters in the Kaliningrad region. / I.V. Karpov, **O.P. Borchevkina**, A.I. Karpov, A.V. Ilminkaya, E.S. Smirnova // Physics of Auroral Phenomena. Proceedings of the XXXIX Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena». — Apatity, 2016. — P. 108–111.

7. **Borchevkina, O.P.** Research of acoustic gravity waves over Kaliningrad region during the solar eclipse of March 20, 2015 / **O.P. Borchevkina**, I.V. Karpov, A.V. Ilminkaya, A.I. Karpov // Proceedings of V International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety. — Kaliningrad, 2016. — P. 443–448.

8. **Borchevkina, O.P.** Influence of strong meteorological processes on the ionospheric parameters / **O.P. Borchevkina**, I.V. Karpov, R.Z. Dadashev, A.V. Ilminkaya // Proceedings of V International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety. — Kaliningrad, 2016. — P. 136–141.

9. **Борчевкина, О.П.** Исследование акустико-гравитационных волн методом лидарного зондирования в Калининграде / **О.П. Борчевкина**, И.В. Карпов, А.В. Ильминская // Материалы XII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. — Томск, 2016. — С. 36-40.

10. **Борчевкина, О.П.** Возмещения вариаций полного электронного содержания в условиях метеорологического шторма 29-30 марта 2015 г. по наблюдениям в Калининграде / **О.П. Борчевкина**, И.В. Карпов // Труды XV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» БШФФ-2017. — Иркутск, 2017. — С. 89-91.

Борчевкина Ольга Павловна

**ЛИДАРНОЕ И СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ
ТРОПОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ, СОЗДАВАЕМЫХ АКУСТИКО-
ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать
Бумага для множительных аппаратов. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Ризограф. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 150 экз. Заказ 135

Отпечатано в издательстве
Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236022, г. Калининград, ул. Гайдара, 6