

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
ИММАНУИЛА КАНТА»**

На правах рукописи



**БОРЧЕВКИНА ОЛЬГА ПАВЛОВНА**

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

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Карпов Иван Викторович

**КАЛИНИНГРАД – 2017**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
ГЛАВА 1. Акустико-гравитационные и внутренние гравитационные волны в атмосфере Земли.....	15
1.1. Изучение роли атмосферных волн в реализации связей слоев атмосферы .....	15
1.2. Механизмы формирования АГВ и ВГВ в атмосфере Земли.....	19
1.3. Основные уравнения и граничные условия .....	23
1.4. Экспериментальные методы наблюдения АГВ и ВГВ в атмосфере Земли.....	29
1.5. АГВ от метеорологических источников .....	35
1.6. Выводы по главе.....	37
ГЛАВА 2. Исследование вариаций параметров атмосферы и ионосферы по данным лидарного зондирования и полного электронного содержания в период прохождения солнечного терминатора .....	38
2.1. Методика проведения эксперимента с применением лидарного зондирования.....	38
2.2. Исследование вариаций нижней атмосферы .....	43
2.3. Исследование вариаций ионосферы в период прохождения солнечного терминатора по наблюдениям сигналов навигационных спутников.....	54
2.4. Исследование АГВ в Калининградской области во время солнечного затмения 20 марта 2015 года .....	69
2.5. Выводы по главе .....	74

ГЛАВА 3. Исследование влияния сильных метеорологических штормов на параметры верхней атмосферы .....	76
3.1. Влияние метеорологических штормов на ионосферные параметры в Калининграде .....	76
3.2. Моделирование возмущение верхней атмосферы вследствие распространения АГВ от поверхности Земли .....	92
3.3. Исследование вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы при локальных метеорологических явлениях в Калининградской области .....	100
3.4. Выводы по главе.....	107
Основные результаты и выводы.....	109
Список сокращений и условных обозначений .....	110
Список рисунков .....	111
Список таблиц .....	117
Список литературы .....	118

## ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию 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.

**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 данной тематике появились в 60-70х годах [12-14] и касались описания процессов генерации и распространения внутренних гравитационных волн ВГВ в верхней атмосфере вследствие геомагнитных возмущений. 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 вариаций параметров атмосферы и ионосферы с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ в условиях возмущений 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 17 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.

**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. Сулова** // 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 «Взаимодействие 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. Il'minskaya, 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. Il'minskaya, 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. Il'minskaya // 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.

## 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.

Во **введении** дана общая характеристика работы, отражена актуальность ее темы, сформулированы цели и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание диссертации.

**Первая глава** представляет собой обзор современных теоретических и экспериментальных представлений о генерации и распространении акустико-гравитационных волн. В **п. 1.1.** на основе анализа публикаций показана роль атмосферных волн в реализации атмосферно-ионосферных связей. Представлена классификация атмосферных волн в атмосфере Земли. Обсуждается проблема взаимодействия тропосфера-ионосфера. В **п. 1.2.** рассматриваются основные механизмы возбуждения акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли, рассматриваются источники генерации АГВ, обусловленные солнечным терминатором и метеорологическими факторами, как наиболее регулярные, что делает их экспериментальные и теоретические исследования очень важным для понимания динамики атмосферных волн. В **п. 1.3.** представлена математическая постановка задачи описания процессов генерации и распространения АГВ в атмосфере, приведен анализ пространственных и временных масштабов АГВ, на основе дисперсионных соотношений. В **п. 1.4.** рассмотрены основные экспериментальные методы наблюдения АГВ и ВГВ в атмосфере Земли. В **п. 1.5.** представлены результаты исследований влияния АГВ, генерируемых метеорологическими источниками на параметры и процессы верхней атмосферы и ионосферы.

Во **второй главе** представлены результаты наблюдений акустико-гравитационных волн в тропосфере и ионосфере на средних широтах в периоды прохождения солнечного терминатора. Наблюдения динамики атмосферных

параметров в тропосфере выполнены методом лидарного зондирования. Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы определялись по наблюдениям интенсивности рассеянного лидарного сигнала. Вариации полного содержания электронов в атмосфере (ионосферный параметр ПЭС) определялись по данным наблюдений сигналов навигационных спутников GPS. Анализ наблюдений показал, что в спектре вариаций атмосферных и ионосферных параметров присутствуют гармоники с периодами акустико-гравитационных волн (АГВ). Усиление волновой активности АГВ отчетливо проявляется в периоды прохождения солнечного терминатора. Анализ динамики спектров вариаций ионосферы в диапазоне периодов АГВ в период прохождения СТ показал, что причиной этих вариаций являются волны, распространяющиеся из нижних слоев атмосферы.

**Третья глава** посвящена исследованию возмущений ионосферы в периоды прохождения метеорологических штормов в Калининградской области. Для анализа структуры вариаций ионосферы рассматривалось изменение со временем спектров вариаций дифференциального ПЭС, полученных в наблюдениях отдельных спутников GPS. Результаты анализа показали, что в периоды сильных метеорологических возмущений отмечается повышение амплитуд вариаций с периодами АГВ. Время релаксации таких возмущений, как правило, не превышает сутки. Основные проявления реакции ионосферы на метеорологические штормы состоят в понижении значений ПЭС и усилении вариаций с периодами АГВ. Эти результаты позволили заключить, что причиной ионосферной реакции является распространение АГВ из области метеорологического шторма и диссипация волн в верхней атмосфере.

Представлены результаты численного эксперимента по изучению влияния локализованного теплового источника в термосфере, имитирующего эффекты диссипации АГВ, на состояние верхней атмосферы и ионосферы. Результаты численных расчетов показали, что учет таких дополнительных источников возмущений верхней атмосферы приводит к возмущениям ионосферы,

качественно согласующимся с наблюдениями.

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

## **ГЛАВА 1. АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

В главе представлен обзор современных теоретических и экспериментальных исследований о генерации и распространении акустико-гравитационных (АГВ) 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 диссипация на ионосферных высотах могут генерировать 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.

### **1.1. Изучение роли атмосферных волн в реализации связей слоев атмосферы**

Волновые движения являются важной и неотъемлемой составляющей динамических процессов на все высотах. Атмосферные волны вносят существенный вклад в общий энергетический баланс среды и оказывают многообразное влияние на процессы в атмосфере и ионосфере Земли [5, 22-24]. С ними связано образование неоднородностей электронной концентрации различных масштабов.

В теоретических и экспериментальных исследованиях в 60-е годы выяснилось, что многочисленные различные по характеру процессы в атмосфере

сопровождается генерацией акустико-гравитационных волн. Работы Мартина [25], Хайнса [14, 26] и Фрэнсиса [15, 16] были в числе первых работ, в которых было указано на важную роль акустико-гравитационных волн (АГВ) для многих физических процессов в атмосфере.

В начальный период исследования АГВ на высотах термосферы и ионосферы были нацелены на изучение вариаций параметров среды в условиях геомагнитных возмущений и выяснении роли этих волн в формировании перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [3, 27].

Экспериментальные исследования показали, что атмосферные волны влияют на широкий спектр явлений в ионосфере и проявляются, как правило, в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Так, например, ВГВ, возбуждаемые в периоды геомагнитных возмущений проявляются в виде средне- и крупномасштабных ПИВов с периодами от 0,5 час. до 2-3 часов. Короткопериодные гравитационные волны, возбуждаемые как в верхней, так и в нижней атмосфере могут вызывать ряд эффектов в ионосфере, как, например, явление F-рассеяния, диффузность и др. [28-34].

Прогресс последних десятилетий в совершенствовании техники и методов проведения, согласованных экспериментальных и теоретических исследований атмосферных и ионосферных процессов обеспечил понимание определяющего влияния на многие из них АГВ.

В настоящее время значительный интерес исследователей направлен на выяснение роли АГВ в реализации связей динамических процессов в различных атмосферных слоях. В экспериментальных исследованиях было установлено, что физические процессы, развивающиеся на поверхности Земли или в нижних слоях атмосферы способны влиять на состояние верхней атмосферы и ионосферы.

Так, например, в наблюдениях параметров ионосферы достоверно установлено, что такие явления, как ураганы, землетрясения и извержения вулканов и другие могут привести к изменениям состояния ионосферы [35-37].

Теоретические подходы к объяснению физических процессов, реализующих такие связи, основываются на представлениях об их волновой природе.

В нижней атмосфере процессы протекают в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Тропосферные явления классифицируются в зависимости от временных и пространственных масштабов в [38]. Мезомасштабные процессы представляют движения порядка до 2000 км на горизонтальной шкале и несколько дней по временной шкале. Ураганы и фронтальные системы являются представительными явлениями таких процессов. Кроме того, мезомасштабные процессы включают в себя также процессы на более коротких масштабах порядка  $\sim 10$  км и несколько периодов Вайсяля-Брента, такие как грозы, небольшие орографические эффекты и т.д.

Такие процессы в нижней атмосфере порождают широкий спектр атмосферных волн. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что гравитационные волны способны существенно возмущать верхние слои атмосферы [39-42].

В теоретических исследованиях процессов распространения показывается, что атмосферные волны, возбуждаемые в нижней атмосфере, распространяются вверх и могут достигать высот ионосферы. При этом вследствие нелинейных и диссипативных процессов возникают локализованные области возмущений в верхней атмосфере, которые, в свою очередь, являются источником генерации вторичных волн [43, 44].

Условия вертикального распространения волн в атмосфере в значительной мере определяются изменением температуры и усилением диссипативных процессов с увеличением высоты. Эти факторы существенно влияют на характер распространения волн так, что значительная часть атмосферных волн, и прежде всего планетарные волны, не достигают больших высот, чем высоты мезосферы и нижней термосферы. Тем не менее, экспериментальные наблюдения показывают,

что вариации параметров ионосферы с периодами планетарных волн наблюдаются и на высотах F2 - области ионосферы, т.е. значительно выше предельных высот, обусловленных диссипативными процессами [45-52].

К настоящему времени наиболее важные особенности процессов генерации и распространения АГВ в верхней атмосфере достаточно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Подробные обзоры таких исследований приведены в обзорах и монографиях [53-58] и обзоров [3, 5, 7, 12, 15, 59-61].

Однако исследования связей динамики верхней и нижней атмосферы, включающие в рассмотрение АГВ, сталкиваются с существенными сложностями, определяемыми нерегулярным характером возникновения возмущений в нижней атмосфере, как во времени появления возмущения, так и в пространственной локализации. В экспериментальных исследованиях эти сложности связаны с малым количеством одновременных наблюдений параметров среды в различных атмосферных слоях, низким пространственным и временным разрешением наблюдений. В теоретических исследованиях ощущается недостаток математических моделей, позволяющих учитывать сложный комплекс физических процессов, определяющих генерацию и распространение АГВ в атмосфере.

Участие АГВ в реализации связей процессов в нижней и верхней атмосфере не вызывает сомнений. При этом для адекватного учета вкладов процессов диссипации волн в общую циркуляцию верхней атмосферы, или потоков энергии и импульса, переносимых АГВ из нижней атмосферы, необходимо знать спектральные характеристики волн, распространяющихся в среде, и пространственные и временные характеристики области возмущений. Однако сложившаяся система наблюдений верхней атмосферы и ионосферы не позволяет получить такие данные. Получение такой информации необходимо для

уточнения роли АГВ, распространяющихся из нижней атмосферы в формировании возмущений верхней атмосферы и ионосферы.

Проблема взаимодействия тропосфера-стратосфера-мезосфера-ионосфера активно обсуждается, поскольку экспериментальные свидетельства связи процессов в ближнем космическом пространстве с тропосферными и стратосферными метеорологическими процессами открывают перспективу создания самосогласованной модели взаимного влияния космических факторов и погодообразующих процессов.

## **1.2. Механизмы формирования АГВ и ВГВ в атмосфере Земли.**

Теоретические исследования показывают, что потоки энергии и импульса, переносимые АГВ из нижних областей атмосферы в верхние сравнимы с теми, которые поступают от солнечного излучения или других источников [16, 62]. В связи с этим необходимо определить основные типы атмосферных возмущений, которые могут выступать в качестве источников возбуждения атмосферных волн. Теоретические оценки и экспериментальные исследования показали, что основными источниками АГВ в нижней атмосфере являются: метеорологические процессы – ураганы, смерчи, мезомасштабная конвекция, орография и проч.; а также ядерные и крупные химические взрывы; вулканические извержения и землетрясения; солнечные затмения и солнечный терминатор; активность полярных сияний; болиды и метеориты; сверхзвуковых струй и запусков космических аппаратов; промышленность, транспорт, крупные города и др. [1, 9, 12, 36, 53, 59].

Механизмы генерации ВГВ достаточно разнообразны. К их числу, кроме неустойчивости вследствие вертикального сдвига скорости, относятся усиленная конвекция, геострофическая адаптация и фронтогенез, орография [63, 64]. Как правило, источники генерации атмосферных волн имеют широкий частотный

спектр. На низких частотах (периоды от нескольких часов до нескольких суток) основной вклад дают изменения погоды синоптического масштаба, приливы, суточный солнечный нагрев и периодические изменения направления циркуляции. На более высоких частотах (периоды составляют от нескольких минут до нескольких часов) главный вклад принадлежит АГВ и ВГВ. Волны могут распространяться от источника в область сильной диссипации [65, 66]. Так происходит в том случае, когда энергия волны распространяется вверх (например, из тропосферы в верхнюю атмосферу и ионосферу), поскольку молекулярная кинетическая вязкость и теплопроводность возрастают на порядок величины на каждые несколько десятков километров по вертикали [53]. Примеры исследования низкочастотных возмущений атмосферы представлены в работах [67-71], где рассматривались генерация волн тепловым источником в однородной атмосфере и при учете сдвига скорости, геострофической адаптации, генерации волн при развитии фронтов, влиянии орографии. Особенности возбуждения атмосферных волн при прохождении теплого и холодного фронтов была проанализирована в работах [72-74].

При всем многообразии источников генерации внутренних волн в атмосфере, в качестве основного источника в нижней и средней атмосфере выделяют механизм неустойчивости сдвигового течения [75-77]. В частности, в работах [78-82] демонстрируется возможность генерации струйным течением длинных волн, которые могут переносить энергию вверх от области сдвига и тем самым играют важную роль в мезомасштабной динамике [64]. Вместе с тем, отмечается важная роль орографических эффектов в возбуждении АГВ [83].

В [4] показано, что в сейсмически активных регионах перед землетрясениями могут существовать достаточно интенсивные источники низкочастотных возмущений нейтральной компоненты атмосферы, которые приводят к генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ). Эти волны, распространяясь до ионосферы, создают возмущения плазмы, достаточные для

возбуждения плазменной неустойчивости Рэля-Тейлора, развитие которой может приводить к наблюдаемым термосферным аномалиям.

Авторы [84] исследовали механизм атмосферных колебаний с периодами около 300 с, которые наблюдались во время извержений в Пинатубо (1991 год) и Аль Чичон (1982), и подтвердили предположение, что тепловая энергия от извержения является причиной наблюдаемых акустических и гравитационных колебаний. Возбуждение инфразвуковых волн в сейсмически активных регионах также подтверждается результатами доплеровского ионосферного зондирования [9, 37].

Большинство из перечисленных источников имеет нерегулярный характер. В экспериментальных исследованиях важное значение имеют методы анализа результатов наблюдений, полученных в сходных геофизических условиях, что позволяет развивать и верифицировать методы анализа результатов наблюдений. Единственным источником возмущений атмосферы, обладающим свойствами регулярности, является солнечный терминатор.

СТ является регулярным, глобальным, пронизывающим всю атмосферную толщу источником возмущений атмосферы. СТ характеризуется резкими изменениями атмосферных параметров, таких как энергия, температура, давление и концентрация электронов на заданной высоте.

В экспериментальных исследованиях наблюдения возмущений атмосферы при прохождении солнечного терминатора позволяют развивать и тестировать методики анализа с целью выделения волновых вкладов. В теоретических исследованиях наблюдения возмущений атмосферы являются удобным средством верификации различных гипотез. Эти обстоятельства определяют постоянный интерес к исследованию волновых возмущений создаваемых солнечным терминатором.

В работах [85-88] подробно описаны особенности явлений, развивающихся в области СТ, и их характеристики. В [86] приведен аналитический обзор

теоретических и экспериментальных результатов исследований СТ как источника неоднородностей в атмосфере и ионосфере. Предложена классификация механизмов генерации волн и неоднородностей атмосферы, дано их краткое описание. Рассмотрен ряд актуальных задач, связанных с дальнейшим изучением солнечного терминатора и создаваемых им эффектов в околоземном космическом пространстве.

В [89] были предприняты попытки регистрировать волны от СТ в нижней атмосфере с помощью записей флуктуации радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне. В результате удалось установить, что, по крайней мере, выделенные гармоники этих флуктуации в интервале 5—100 минут обусловлены атмосферными волнами.

Теоретические исследования свойств акустико-гравитационных волн в реальной атмосфере затруднено довольно сложным характером зависимости температуры атмосферы от высоты. Учесть высотную зависимость атмосферной температуры при решении задачи о распространении АГВ можно решить с помощью численных методов. В последние годы разработаны численные модели атмосферных волн, позволяющие изучать процессы с учетом реальной стратификации атмосферы [18, 20, 21]. Применение таких моделей к исследованию процессов распространения волн в атмосфере расширяет теоретические представления о роли волн данного диапазона в реализации связей в системе "тропосфера-ионосфера".

Таким образом, анализ результатов наблюдений волновых процессов в атмосфере позволил выделить основные источники генерации АГВ в нижней атмосфере. Большинство известных источников АГВ в атмосфере носите нерегулярный характер, что существенно затрудняет как экспериментальные, так и теоретические исследования, процессов распространения АГВ и их участия в формировании возмущений верхней атмосферы и ионосферы. Особый интерес для исследователей представляет комплексные исследования процессов,

развивающихся в области солнечного терминатора, в силу регулярности этого явления. В рамках представленного исследования, исследованию возмущений в области СТ также уделяется большое внимание, поскольку это создает возможность апробации и верификации применяемых методов анализа результатов наблюдений.

### 1.3. Основные уравнения и граничные условия

Теоретическое описание АГВ в атмосфере строится на основе предположений о том, что движения в атмосфере могут быть описаны уравнениями для сплошной среды типа Эйлера или Навье-Стокса для сжимаемого идеального газа. Полагая, что периоды рассматриваемых волн не превышают 2-3 часов, а длины волн сотен километров, можно не учитывать влияния сферичности Земли и силы Кориолиса и рассматривать двумерную систему уравнений для атмосферного газа.

Традиционно, для исследования спектральных характеристик АГВ, рассматривается система двумерных (высота - горизонтальная координата) уравнений без учета диссипативных процессов, включающая следующие уравнения:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \vec{U} + (\vec{U} \nabla) \rho = 0, \quad (1.1)$$

Уравнение для скорости, в котором принято, что ускорение определяется только силой тяжести и градиентом давления:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) \vec{U} \right] = -\nabla P + \rho \vec{g}, \quad (1.2)$$

И уравнение, вытекающее из предположения об адиабатичности:

$$\rho \left[ \frac{\partial P}{\partial t} + \vec{U} \nabla p \right] = \gamma P \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{U} \nabla \rho \right). \quad (1.3)$$

$$P = \rho R T \quad (1.4)$$

$\rho, \vec{U}, P, T, \gamma$  – плотность, скорость, давление, температура и отношение удельных теплоемкостей [90].

Система уравнений (1.1-1.4) линеаризуется в предположении, что волновые возмущения являются малыми:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \rho'; \\ \vec{U} &= \vec{U}_0 + \vec{U}'; \\ P &= P_0 + P'; \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $\rho', P', \vec{U}'$  – волновые возмущения атмосферных параметров.  $\vec{U}' = (U'_x, U'_z)$ .

Далее будем полагать, что невозмущенная скорость ветра равна нулю и невозмущенная атмосфера находится в состоянии гидростатического равновесия.

В этом случае:

$$\nabla P_0 = \rho_0 g \quad (1.6)$$

(1.6) – уравнение гидростатического равновесия атмосферы.

Для простоты обычно рассматривается изотермический случай, когда температура основного состояния атмосферы не меняется во времени и не зависит от координат.

Подстановка (1.5) в уравнения (1.1)-(1.4) и, сохранив в уравнениях лишь члены первого порядка малости, приводит к системе линейных уравнений:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{U}' + \vec{U}' \nabla \rho_0 = 0, \quad (1.7)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{U}'}{\partial t} + \nabla P' - \rho' g = -\nabla P_0 + \rho_0 g, \quad (1.8)$$

$$\rho_0 \left( \frac{\partial P'}{\partial t} + \vec{U}' \nabla P_0 \right) = \gamma P_0 \left( \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \vec{U}' \nabla \rho_0 \right). \quad (1.9)$$

Координаты  $x, z$  выбираются так, чтобы ось  $z$  была направлена вверх, противоположно  $g$ , а  $x$  - горизонтальная координата.

В таких координатах интегрирование условия гидростатического равновесия (1.6) дает следующие выражения для вертикальной зависимости для невозмущенных значений давления и плотности:

$$P_0 = P_g \exp(-z/H), \quad (1.10)$$

$$\rho_0 = \rho_g \exp(-z/H), \quad (1.11)$$

$P_g, \rho_g$  - некоторые постоянные значения величин  $P_0, \rho_0$  на уровне земли.  $H = RT/g$  - высота однородной атмосферы, постоянна при принятых предположениях.

Если в уравнении (1.7 – 1.9) учесть условие (1.6), а  $\nabla \rho_0$  и  $\nabla P_0$  в уравнениях (1.4) и (1.6) выразить с помощью уравнений (1.10), то получим:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{U}' - \rho_0 \frac{U'_z}{H} = 0, \quad (1.12)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{U}'}{\partial t} + \nabla P' - \rho' g = 0, \quad (1.13)$$

$$\rho_0 \left( \frac{\partial P'}{\partial t} - P_0 \frac{\vec{U}'_z}{H} \right) = \gamma P_0 \left( \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \rho_0 \frac{\vec{U}'_z}{H} \right). \quad (1.14)$$

Подробный анализ волновых решений системы (1.12 – 1.14) проведен в работах [7, 14, 17, 19, 53, 91, 92].

Решения уравнения (1.12)-(1.14) ищутся в виде гармонических волн. Решения, имеющие такой вид, определяются выражением

$$\frac{\rho'}{\rho_0 R} = \frac{P'}{P_0 P} = \frac{U'_x}{X} = \frac{U'_z}{Z} = A \exp\left(\frac{z}{2H}\right) \exp\{i(\omega t - k_x x - k_z z)\}, \quad (1.15)$$

Где

–  $A$  – произвольный амплитудный множитель,

- $\omega$  – произвольная угловая частота,
- $k_x$  и  $k_y$  – соответственно горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора  $\vec{k}$ , направление которого определяет распространения фазы;
- $R, P, X, Z$  – некоторые постоянные, которые, будучи умноженными на правую часть уравнения (14), определяют соответственно амплитуду относительно возмущения плотности ( $\rho/\rho_0$ ), возмущения давления  $P/P_0$ , возмущения горизонтальной и вертикальных скоростей ветра ( $U'_x$  и  $U'_z$ ).

Решения, имеющие физический смысл, представляют собой действительные части выражений (1.15). Эти действительные части, конечно, и сами являются решениями уравнений (1.12)-(1.14). Однако чтобы решение имело вид (1.15) необходимо, чтобы

$$k_z^2 = \left( \frac{\omega_g^2}{\omega^2} \right) k_x^2 - k_x^2 - \frac{1}{4H^2} + \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (1.16)$$

Где

$$\omega_g^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{c^2}. \quad (1.17)$$

Анализ уравнения (1.16) показывает, что в диапазоне частот между  $\omega_g$  и  $\omega_a$ , обе компоненты волнового вектора  $k_x$  и  $k_y$  не могут быть одновременно действительными, где

$$\omega_a = \gamma g / 2c \quad (1.18)$$

При частотах, много больших  $\omega_a$ , соотношение (1.16) становится близким к простому соотношению для звуковых волн:

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2}.$$

Волны этих частот называют акустическими,  $\omega_a$  есть граничная частота акустических волн или частота акустического обрезания. На частотах меньших

$\omega_g$ , большую роль играют гравитационные эффекты – эти волны называют гравитационными. Частоту  $\omega_g$  называются частотой Вайсяля-Брента. Она имеет физический смысл частоты собственных колебаний элемента объема атмосферного воздуха, когда возвращающей силой является не просто сила сжатия, как в случае звуковых волн, а выталкивающая сила Архимеда – разность между силами тяжести и градиента давления [53, 58].

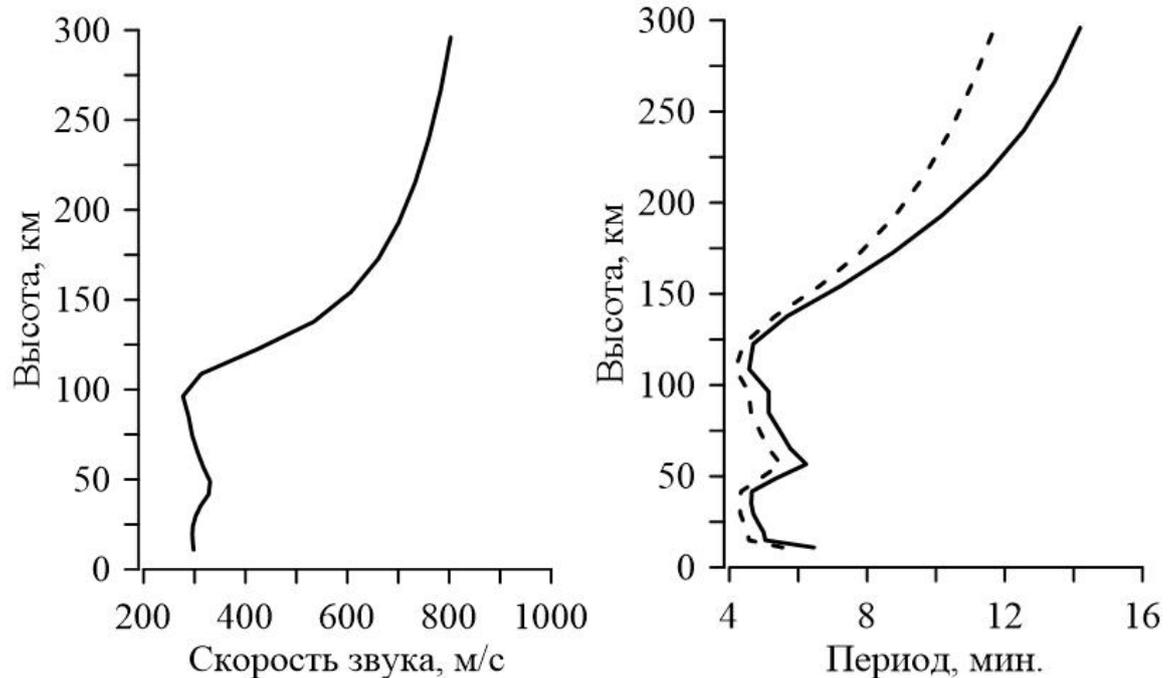
Для атмосферы значение частоты Вайсяля-Брента определяется следующей формулой:

$$\omega_g \equiv \left[ \frac{\gamma-1}{\gamma} \right] \frac{g}{H}.$$

Из дисперсионного соотношения для ВГВ следует, что эти волны имеют, в отличие от акустических волн, поперечную составляющую волнового вектора, обусловленную действием силы тяжести, и, следовательно, движение газа в поле волны описывает эллиптическую траекторию.

Таким образом, выражения (1.16, 1.17) описывают волновые процессы - акустико-гравитационные волны в атмосфере в рамках сделанных предположений относительно малости амплитуд возмущений и свойств фонового состояния атмосферы.

Реальная атмосфера существенно отличается от изотермической. На рисунках 1.1 представлены вертикальные профили скорости звука, частот Вайсяля-Брента и акустического обрезания, рассчитанные по эмпирической модели MSIS [93].



**Рисунок 1.1.** Вертикальный профиль (а) скорости звука, (б) частот Вейсяля-Брента (толстая линия) и акустического обрезания (тонкая линия), рассчитанные по модели MSIS [94].

Как видно из рис. 1.1, вертикальная структура этих важных параметров сильно зависит от высоты. Следовательно, результаты анализа системы уравнений для АГВ в приближении изотермической атмосферы нужно рассматривать как качественные. В работе [95] получены дисперсионные соотношения для ВГВ при реальной стратификации атмосферы. Однако реальная стратификация аппроксимируется многочленом, зависящим от вертикальной координаты, и получаемые решения в виде разложения в степенные ряды не имеют такой наглядности, как в изотермическом случае.

Очевидно, что значительная изменчивость частот Вейсяля-Брента и акустического обрезания с высотой будут существенно влиять на характер распространения волн из нижней атмосферы. При этом, несмотря на принципиальные различия акустических и гравитационных волн, в атмосфере есть высотные области, на которых весьма затруднительно разделить эти две ветви атмосферных волн в наблюдениях вариаций параметров атмосферы. В

настоящее время, возможность решения задачи о распространении АГВ в атмосфере с учетом реальной стратификации атмосферы возможно только с применением численных моделей. В работах [18, 65, 96, 97] продемонстрированы принципиальные возможности таких моделей в описании процессов распространения АГВ. Результаты теоретических исследований с применением таких моделей выявляют новые особенности проявления процессов распространения АГВ в атмосфере и позволяют дать физическое объяснение наблюдаемым возмущениям атмосферы и ионосферы, которое невозможно получить при рассмотрении упрощенных представлений о среде, каким является изотермическое приближение.

#### **1.4. Экспериментальные методы наблюдения АГВ и ВГВ в атмосфере Земли**

Методы наблюдений параметров атмосферы с целью изучения АГВ и ВГВ в атмосфере Земли условно можно разделить на две части. Одна из них основана на прямых измерениях каких-либо из перечисленных характеристик среды (или их совокупности) и подробно изложена в обзорах [64, 98]. В другой регистрируют физические процессы и их характеристики, зависящие от свойств среды, меняющихся при распространении в ней АГВ (ионозонды; радиолокация неоднородностей в различных областях ионосферы; радиоакустическое зондирование) [99, 100].

Современные подходы к исследованию атмосферных волн на высотах нижней атмосферы определяются возможностью проведения комплексных исследований, охватывающих пространственные и временные характеристики нескольких наблюдаемых параметров.

Наибольшее распространение получили исследования, выполняемые по следующим основным направлениям:

1. Наблюдения вариаций давления на основе показаний сети наземных микробарографов, состоящих, как минимум, из трех-четырех станций, а иногда и много больше [4, 101, 102].

Такие наблюдения позволяют выделять спектральные характеристики вариаций давления в диапазонах акустических и внутренних гравитационных волн.

2. Вертикальное зондирование атмосферы (измерение температуры, давления, скорости ветра в зависимости от высоты вблизи точек расположения станций). Вертикальное зондирование проводится различными методами, например, запуск радиозондов и акустическое зондирование.

3. Самолетные измерения скорости ветра и температуры. Эти измерения позволяют получать пространственную картину расположения областей волновой активности, в частности оценить значение орографии, близи фронтальных зон, струйных течений [103, 104].

4. Оценка сопутствующей метеорологической обстановки по синоптическим картам и оценки расположения зон конвекции, облачности и осадков по радиолокационным и спутниковым наблюдениям [6].

В таких исследованиях можно определить характеристики планетарных волновых возмущений.

В работе [102] представлен обзор работ, выполненных методом лидарного зондирования на полуострове Камчатка, по регистрации волновых возмущений в атмосфере от природных источников. Дана феноменологическая классификация волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений и показана возможность регистрации волновых возмущений в атмосфере, генерируемых поршневым воздействием водной поверхности от подводных землетрясений.

В статье [6] приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования статистических характеристик (дисперсий, частотных спектров и когерентностей) мезомасштабных флуктуаций скорости ветра в устойчивой нижней атмосфере в диапазоне от 1 минуты до 1 часа. В работе [101] представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости тропосферы с помощью сети приемников глобальных спутниковых навигационных систем. По экспериментальным данным сети приемников, разнесенных на расстояния от 1 до 35 км, получены оценки сезонной и суточной изменчивости мезомасштабных неоднородностей тропосферной задержки дециметровых радиоволн. Обнаружена связь с полями влажности давления и полями скорости ветра. В [105] установлено, что изменения коэффициента вариации максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы в дневное время хорошо согласуются с вариациями максимальной скорости газа. Так, на высоте соответствующей атмосферному давлению 10 мб и долготе 102,5 в.д. в интервале широт 40-90 с.ш. коэффициент корреляции  $r = 0,8$ , что может объясняться генерацией ВГВ, при достижении определенных критических скоростей ветра, струйным течением волновых возмущений, как в стратосфере, так и в ионосфере. Данные спутниковых измерений температуры подтвердили наличие существенных вариаций параметров стратосферы и верхней мезосферы в периоды усиления волновой возмущенности F2-слоя ионосферы. В [106] обсуждается технология пассивной космической локации атмосферы в инфракрасном и микроволновом диапазонах. По результатам локации в тропосфере обнаружены проявления акустических колебаний - внутренних гравитационных волн (ВГВ) в интервале высот от поверхности до границы тропопаузы, а также определены условия появления таких волн при возникновении метеорологических и сейсмических возмущений, взрывов.

Авторы [107] исследовали колебания в диапазоне периодов от 15 до 180 минут в вариациях плотности электронов в F-области ионосферы. Профили плотности электронов получены на среднеширотных ионосферных станциях

Pruhonicе (49,9° с.ш., 14,5° в.д.) и Ebro (40,8° с.ш., 0,5° в.д.). Для анализа были использованы данные с временным разрешением 5 минут. Суточные изменения активности АГВ показали четкое повышение во время и через несколько часов после восхода Солнца. Обнаружены волновые структуры с периодами 60-75 минут, систематически проявляющиеся во время заката и через несколько часов после него, которые распространяются до высот 180-220 км. Тем не менее, из-за систематического возникновения этих волн во время заката, авторы предлагают, что наиболее вероятный источник данных волн является движущаяся солнечный терминатор. Процессы нагрева, связанные с быстро растущей интенсивностью солнечного излучения во время восхода солнца, может действовать как источник АГВ в ионосфере, что и проявляется в колебаниях концентрации электронов с периодами этих волн.

Экспериментальные исследования ионосферных возмущений в области СТ и в периоды солнечных затмений, выполняются радиофизическими методами, что позволяет оценить состояние ионосферы. Так, например, анализ результатов доплеровского зондирования ионосферы в периоды нескольких солнечных затмений [108-110] выявили частотные характеристики вариаций ионосферы и показали, что в эти периоды отмечается повышение амплитуд вариаций с частотами, соответствующими АГВ и ВГВ.

В настоящее время широкое распространение получили методы экспериментальных исследований ионосферы на основе приема сигналов навигационных спутников. В таких наблюдениях определяется полное содержание электронов - ионосферный параметр ПЭС (Total Electron Content) на трассе «спутник - приемник сигналов». Относительная простота этих методов способствовала быстрому росту числа станций приема спутниковых сигналов и, соответственно, повышению пространственного разрешения в наблюдениях. Подробное описание технологий ионосферных наблюдений этими методами представлено в [111-118].

Совершенствование методов анализа наблюдений ПЭС позволило существенно расширить представления о характере вариаций ионосферы в различных геофизических условиях, выявить новые типы ионосферных неоднородностей, связанных, в том числе, с процессами в нижних атмосферных слоях и на поверхности Земли.

Исследования динамики ионосферы в области СТ, на основе наблюдений сигналов навигационных спутников также демонстрируют сложный характер ионосферных возмущений. Возможность наблюдать планетарные возмущения в такие периоды позволила связать ионосферные возмущения в области терминатора с прохождением терминатора в магнитосопряженной точке и предположить магнитогидродинамическую природу таких возмущений [119]. С другой стороны, в наблюдениях [120] на основе анализа изменений спектров вариаций ПЭС в периоды прохождения СТ делается вывод о гидродинамической природе возмущений с периодами меньше периода Вяйсяля-Брента в ионосфере. Принимая во внимание разницу в подходах к анализу экспериментальных данных в этих работах, можно заключить, что экспериментальные исследования подтверждают теоретические представления о том, что в области СТ возбуждается широкий спектр АГВ и ВГВ. Усиление волн в ионосфере в переходные часы суток подтверждается с помощью методов доплеровского зондирования, возвратно-наклонного зондирования и другими радиофизическими методами [121].

В экспериментальных исследованиях довольно трудно выявить вариации атмосферных и ионосферных параметров со звуковыми частотами, в силу особенностей сложившихся традиционных методов наблюдения ионосферы, например, методов вертикального зондирования ионосферы. Выполненные экспериментальные исследования волн этого диапазона в верхней атмосфере весьма немногочисленны, однако их результаты убедительно показывают присутствие этих волн в вариациях атмосферных и ионосферных параметров [2,

9, 122-125]. Важный результат исследований вариаций ионосферы в области СТ связан с выделением в спектрах вариаций атмосферы и ионосферы гармоник с периодами АГВ и ВГВ. Немногочисленные теоретические исследования процессов генерации и распространения АГВ и ВГВ показали, что волны этого частотного диапазона могут существенно влиять на динамику верхней атмосферы [4, 18, 21, 95, 126-133].

Однако при весьма многочисленном исследовании волновых вариаций атмосферы и ионосферы, физические механизмы, определяющие процессы генерации и распространения акустических волн в атмосфере и ионосфере остаются не до конца выясненными. Очевидно, что их дальнейшее изучение предполагает включение в рассмотрение экспериментальных данных о вариациях других параметров среды, а также возможность получения данных о вариациях среды в различных высотных слоях атмосферы. Таких исследований пока явно недостаточно, однако не вызывает сомнений, что именно в таких исследованиях будут сделаны наиболее важные шаги в понимании процессов, определяющих связи различных атмосферных слоев. Сопоставление экспериментальных и теоретических исследований позволяет достаточно хорошо представить возможные механизмы генерации и распространения АГВ и ВГВ, а также оценить ту роль, которую данные волны играют в динамике верхней атмосферы и ионосферы и дать физически обоснованную интерпретацию наблюдаемым явлениям.

Отметим также, что понимание важности волн этого частотного диапазона в возмущении верхней атмосферы предполагает включение эффектов, обусловленных распространением волн, в модельное описание крупномасштабной динамики верхней атмосферы и ионосферы. Развитые процедуры параметризации дополнительных источников энергии и импульса верхней атмосферы основываются на предположениях о амплитудно-частотных характеристиках волн, приходящих из нижней атмосферы. Теоретические

исследования, выполненные в последние годы, показывают, что эффективность процессов возмущения верхней атмосферы определяется не только спектральными характеристиками входящих волн, но и их эволюцией во времени. Эти обстоятельства существенно затрудняют процедуры параметризации вкладов волн в возмущения верхней атмосферы. При этом очевидно, возрастает важность исследований характеристик АГВ в условиях реально развивающихся динамических процессов в нижней атмосфере, в которых, как уже показано, возбуждаются волны, способные распространяться в верхнюю атмосферу.

### **1.5. АГВ от метеорологических источников**

Метеорологические процессы в нижних слоях, особенно в тропосфере, влияют на ионосферу преимущественно через распространяющиеся вверх волны и их модификацию, и модуляцию [13].

Различные процессы в нижних слоях атмосферы, в частности в тропосфере, часто обобщаются под термином «метеорологические процессы». Они могут влиять на ионосферу по двум каналам:

1. Электрические и электромагнитные явления
2. Распространяющиеся вверх волны в нейтральной атмосфере.

Роль электродинамических каналов возмущений верхней атмосферы и их роль в возбуждении средне и крупномасштабных неоднородностей ионосферы изучена недостаточно. В то же время, влияние атмосферных волн на состояние верхней атмосферы и ионосферы не вызывает сомнений и подтверждается результатами наблюдений.

Анализ результатов ионосферных наблюдений, демонстрирующих влияние нижней атмосферы, в периоды прохождения метеорологических фронтов,

стратосферных потеплений, сейсмических событий представлены в многочисленных публикациях и, в частности, в работах [1, 4, 5, 36, 61, 134-138]. В частности, атмосферные гравитационные волны были обнаружены в E- и F-областях ионосферы [3, 10, 45, 47, 107].

Метеорологические влияния играют важную роль в общей изменчивости ионосферы. Большинство «метеорологических влияний» на ионосферу возникает благодаря распространению гравитационных, приливных и планетарных волн [36, 40]. Волны, приносящие снизу значительную энергию, могут влиять на многие процессы в верхней атмосфере и термосфере, в том числе на химический состав и на ионосферу.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям влияния АГВ, генерируемых метеорологическим источниками (грозами, развивающимися кучевыми облаками, штормами, шквалами) на параметры и процессы верхней атмосферы и термосферы, которые могут проявляться в вариациях ионосферных параметров, таких как температура и плотность электронов и ионов [12, 35, 139-143].

В частности, изменения структуры ионосферных вариаций в периоды метеорологических возмущений представлены в работах [12, 44, 47, 144-147].

Сильные метеорологические возмущения являются климатической особенностью Калининградского региона, что, в принципе, позволяет выделить характерные особенности метеорологических проявлений в изменении состояния ионосферы. Для исследования ионосферной динамики в условиях метеорологических возмущений были выбраны периоды, в течение которых отмечались наиболее сильные метеорологические шторма на территории Калининградской области.

## 1.6. Выводы по главе

Таким образом, волновые процессы в атмосфере являются предметом интенсивных научных исследований, поскольку оказывают доминирующее влияние в реализации связей различных слоев атмосферы. Значительный прогресс экспериментальных и теоретических исследований волновых процессов в верхней атмосфере существенно расширил представления о возбуждении и распространении АГВ и ВГВ атмосфере Земли. В экспериментальных исследованиях достоверно установлена связь динамических процессов в нижней атмосфере с возмущениями в верхней атмосфере и ионосфере. Основные гипотезы о физических процессах реализующих связи различных слоев атмосферы основываются на представлениях о генерации АГВ и ВГВ в нижней атмосфере и их распространении в верхнюю атмосферу и ионосферу. Несмотря на значительный прогресс в экспериментальных исследованиях, до настоящего времени остаются недостаточно изученными спектральные характеристики таких волн и их связь с пространственными и временными масштабами возмущений нижней атмосферы. Так, например, в исследованиях влияния возмущений нижней атмосферы на верхнюю атмосферу и ионосферу значительный интерес проявляется к изучению свойств АГВ и ВГВ, определяемых возможностью их привлечения к объяснению метеорологических, сейсмических и других возмущений ионосферы. При этом, однако, этот диапазон атмосферных волн остается наименее изученным. Это обстоятельство и определяет направление диссертационного исследования, направленное на развитие методов экспериментальных исследований АГВ и ВГВ в условиях возмущений в нижней атмосфере.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ПЕРИОД ПРОХОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА**

В 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. Вариации полного содержания электронов в атмосфере (ионосферный параметр ПЭС) определялись по данным наблюдений сигналов навигационных спутников GPS. Анализ наблюдений показал, что в спектре вариаций атмосферных и ионосферных параметров присутствуют акустико-гравитационные волны (АГВ), проходящие из нижней атмосферы. Усиление волновой активности отчетливо проявляется в периоды прохождения солнечного терминатора.

### **2.1. Методика проведения эксперимента с применением лидарного зондирования**

Гравитационные волны в верхней атмосфере могут наблюдаться с помощью флуктуаций параметров нейтрального газа или вариации ионосферной плазмы с использованием различных радиофизических методов (некогерентные радары, доплеровские радары, ПЭС и т.д.) [59, 148]. Для изучения региональных и крупномасштабных пространственно-временных изменений полей атмосферных параметров в настоящее время в мире широко используются сети лидарных

станций, на которых проводятся регулярные скоординированные измерения методами лазерного зондирования атмосферы.

В настоящее время в исследованиях атмосферы получили широкое распространение активные методы зондирования, в частности, лидарное зондирование, для изучения характеристик атмосферных параметров в экологических целях [149-152]. Лидар (light identification detection and ranging) представляет собой аналог радара, работающего в оптическом диапазоне. Источником излучения в лидаре является лазер. Распространение лазерного луча в атмосфере сопровождается его рассеиванием на флуктуациях плотности (релеевское рассеивание) и мельчайших частицах - аэрозолях, которые во многих случаях являются загрязняющим атмосферу компонентом. По величине и форме рассеянного сигнала, принимаемого лидаром, можно судить о распределении аэрозоля и его характеристиках [150, 153]. В [149] подробно описаны особенности зондирования аэрозолей тропосферы и стратосферы лидарами. Распространяясь по атмосферной трассе зондирования, лазерный импульс испытывает поглощение и рассеивание на молекулах и аэрозолях атмосферы. Часть излучения, рассеянная атмосферой назад в направлении лидарной системы, может быть собрана и сфокусирована с помощью приемной аппаратуры на фотодетектор, который преобразует ее в электрический сигнал, пропорциональный падающему световому потоку. При этом расстояние до любого рассеивающего объема на трассе зондирования однозначно определяется по значению временного интервала с момента послышки лазерного импульса, поскольку свет распространяется с известной скоростью. А интенсивность принятого 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 [150, 154, 155].

Преимущества лазерного зондирования атмосферы:

- Дистанционность лазерных измерений.
- Возможность определить выбранную характеристику воздушной среды на любом направлении лазерного луча и на различных высотах.
- Хорошее пространственно-временное разрешение. Лазерное зондирование практически мгновенно дает сведения по всей трассе измерений во много раз быстрее, чем изменяется состояние самой атмосферы.
- Возможность проведения длительных непрерывных измерений.

В представленных исследованиях наблюдения вариаций параметров нижней атмосферы осуществлены с применением атмосферного лидара LSA-2с производства ООО «Обнинская фотоника» (Россия). Двухволновой лидар LSA-2с (532нм, 1064нм) предназначен для экологических наблюдений характеристик параметров атмосферы и позволяет проводить зондирование на расстояниях до 10-12 км. Характеристики параметров атмосферы могут быть определены на различных высотах в атмосфере, в пределах длины трассы зондирования, при изменении угла наклона трассы к поверхности. Методы обработки результатов измерений, позволяющие определить коэффициенты обратного рассеивания в обоих каналах излучения, объемную концентрацию аэрозоля и эффективный радиус рассеивания, изложены в работах [156, 157] и реализованы в виде программного комплекса для обеспечения измерений и их обработки на данном лидаре. На рисунке 2.1. представлена принципиальная схема лидара LSA-2с.



**Рисунок 2.1.** Принципиальная схема лидара.

В таблице 2.1 представлены основные технические характеристики атмосферного двухволнового лидара LSA-2с [154], установленного в Балтийском федеральном университете имени Иммануила Канта.

Схема измерения	Дистанционная
Диапазон измерений	До 10-12 км
<i>Лазерный блок</i>	
Излучатель	Nd:YAG лазер LS-2131
Рабочие длины волн	1064, 532 нм
Энергия импульса лазера на длине волны 1064 нм	до 100 мДж

Энергия импульса лазера на длине волны 532 нм	до 50 мДж
Частота повторения импульсов	Не более 20 Гц
Энергия накачки	До 25 Дж
<i>Приемный телескоп</i>	
Приемник обратно рассеянной радиации	Телескоп типа Квази-Кассегрена
Диаметр главного зеркала телескопа	260 мм
Фокусное расстояние	1050 мм
Диапазон сканирования по углу места	От $-10^0$ до $+90^0$ от горизонтали
Диапазон сканирования по азимуту	От $-180^0$ до $+180^0$
<i>Фотоприемный блок</i>	
Число приемных каналов	2
Фотоприемники	
-канал 1064 нм	Лавинный фотодиод с квантовой эффективностью фотокатода 40%
- канал 532 нм	Фотоумножитель (ФЭУ-100) с квантовой эффективностью фотокатода 10%
Полуширина пропускания интерфильтра на длине волны 1064 нм	3 нм
Полуширина пропускания интерфильтра на длине волны 532 нм	2 нм
<i>Система регистрации и обработки сигналов</i>	
Режим обработки сигналов	Аналоговый
Разрядность АЦП	12 бит
Частота стробирования	30 МГц
Спектральное разрешение	5 м
Число измеряемых точек	2048

**Таблица 2.1.** Технические характеристики лидара LSA-2с.

Для исследования вариаций параметров нижней атмосферы была разработана программа обработки результатов лидарного зондирования нижней атмосферы и получения спектральных характеристик рассеяного лидарного сигнала «E-LIS» (elaboration lidar signal). Для данной программы получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2016616204. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2016 года. Программа применяется при анализе результатов лидарного зондирования и позволяет представить в наглядном виде динамику рассеяного лидарного сигнала и его спектральные характеристики. Программа включает в себя блок сбора лидарных данных и разработанные в системе компьютерной алгебры MathCAD модули, позволяющие выполнить процедуры гармонического анализа данных наблюдений.

Программа «E-LIS» включает в себя следующие программные модули:

- Подсистема расчета динамического спектра лидарного сигнала и выявления характерных периодов волновых вариаций нижней атмосферы;
- Подсистема визуализации спектра вариаций рассеяного лидарного сигнала от Земли до 10 км по высоте;
- Подсистема расчета динамических спектров акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн в период проведения эксперимента на определенных выбранных высотах.

## **2.2. Исследование вариаций нижней атмосферы**

Наблюдаемый на приемнике рассеянный лидарный сигнал  $f_m(t)$  отражает интегральную динамику атмосферы на траектории луча распространения длиной  $c\Delta tm$  (где  $m$  - номер строба, максимальное значение  $m = 2000$ ;  $\Delta t$  - длительность импульса;  $c$  - скорость света;  $t$  - время проведения измерения). В процессе

наблюдений определяется функция  $f_m(t)$  - отражающая динамику изменения интенсивности сигнала на трассе длиной  $c\Delta t$ . Спектральный анализ полученных в наблюдениях временных рядов позволил определить частотные диапазоны, характерные для вариаций атмосферных параметров на различных высотах. Для исследования динамики выделенных атмосферных слоев используется функция  $F$  - являющаяся разностью интенсивности сигналов, полученных приемником в различные моменты времени (разность интенсивности сигналов для различных стробов). Введенная в алгоритме обработки лидарного сигнала функция  $F(t)$  отражает динамику слоя толщиной  $d=c\Delta t$  на расстоянии  $c\Delta t$ .

$$F_m(t) = f_{m+1}(t) - f_m(t).$$

Для определения спектра  $F(t)$  использовалась процедуры быстрого преобразования Фурье.

Для уменьшения вклада шумовых составляющих в анализе структуры сигнала применяется оконное осреднение с периодом  $i_0\tau$  (где  $i_0$ -количество отсчетов, включенных в интервал осреднения;  $\tau$  - время между двумя последовательными измерениями). В анализе выполненных наблюдений длительность интервала осреднения обычно составляла  $\sim 2$  мин. Процедура спектрального анализа, таким образом, применялась для функции  $fs(t)$  определенной следующим образом:

$$fs(t_k) = \sum_{l=k}^{k+i_0} \frac{F(t_l)}{i_0 + 1}.$$

Для определения спектра функции  $fs(t)$  использовалась процедуры быстрого преобразования Фурье, реализованные в пакете MathCAD. Амплитуды вариаций с фиксированными частотами позволяют судить о вкладах соответствующих гармоник.

Как отмечалось выше, солнечный терминатор является регулярным источником возбуждения АГВ и ВГВ. Исследование вариаций тропосферных

параметров (интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала) в период прохождения СТ позволяет тестировать предложенную процедуру анализа результатов лидарного зондирования. Распространение АГВ и ВГВ в нижней атмосфере приводит к изменению характеристик атмосферных параметров, что влияет на изменение интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала.

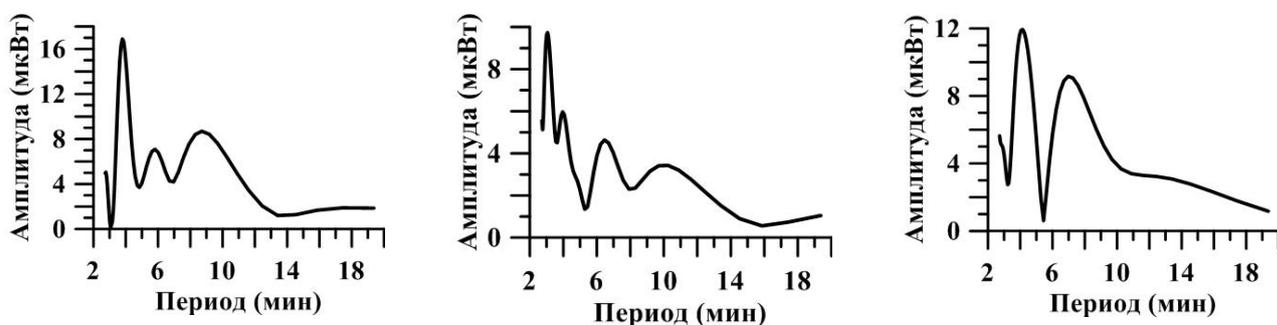
На рисунках 2.2–2.9 представлены спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала на длинах волн 1064 и 532 нм на разных высотах в наблюдениях, выполненных в 2012 году и включающих период прохождения СТ над Калининградом (54° с.ш. 20° в.д.). Время проведения наблюдений показано в таблице 2.2.

Дата измерений	Время измерений (местное время)	Время прохождения солнечного терминатора
28.08.2012	16.50-21.29 (279 мин)	20.41
19.03.2012	6.15-11.06 (295 мин)	7.43
06.12.2012	16.17-18.36 (139 мин)	17.14
03.10.2012	18.06-20.24 (138 мин)	19.10

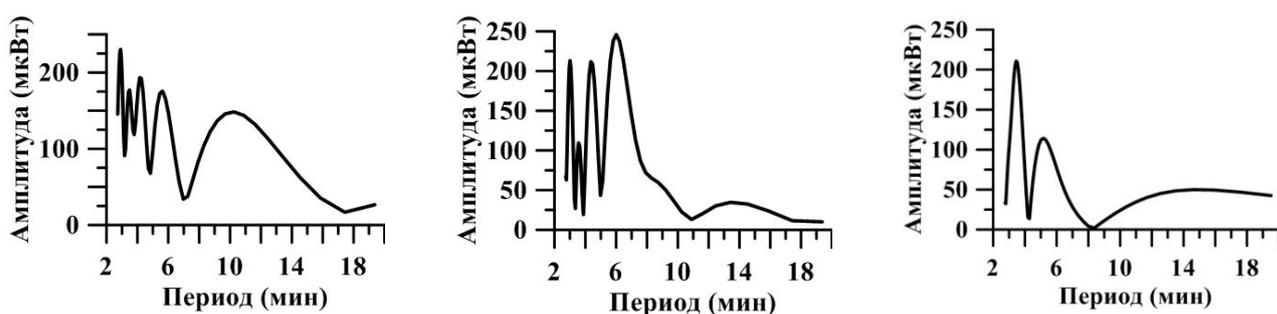
**Таблица 2.2.** Время проведения наблюдений вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала

В анализе наблюдений основное внимание уделялось выделению вариаций с периодами от 2 до 20 минут, вызванных распространением АГВ и короткомасштабных ВГВ.

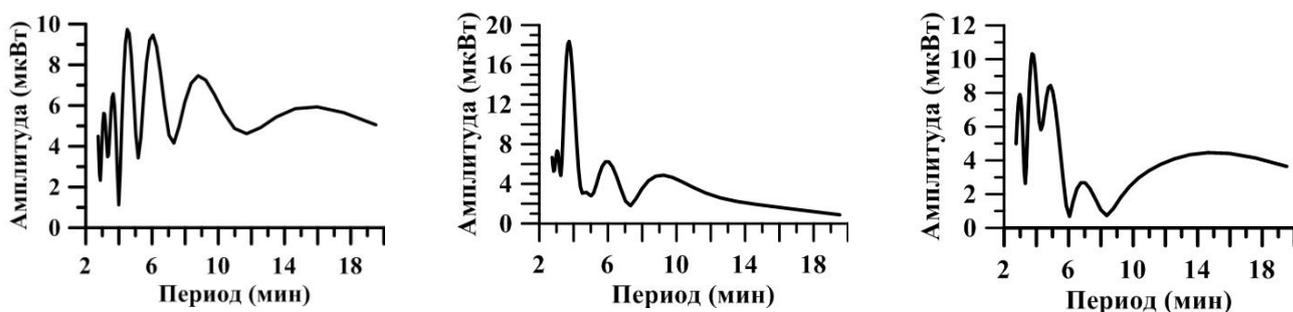
Как видно на рисунках в вариациях спектра параметров атмосферы присутствуют гармоники с периодами менее 4мин (АГВ) и гармоники с периодами 6-10 мин – ВГВ.



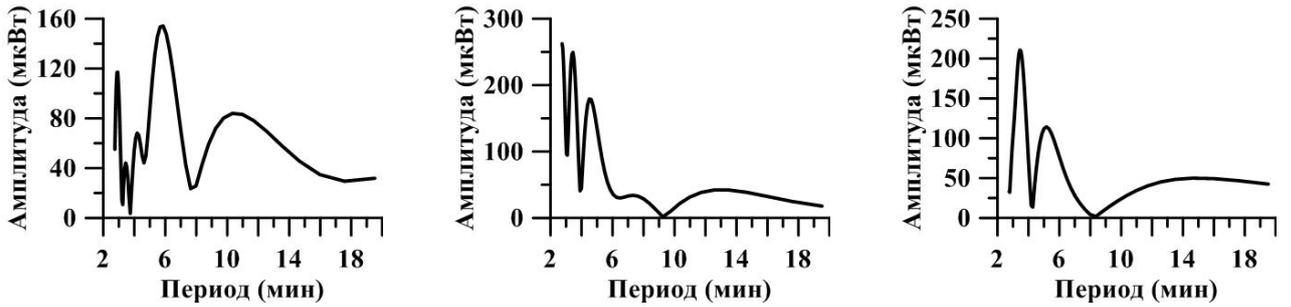
**Рисунок 2.2.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.



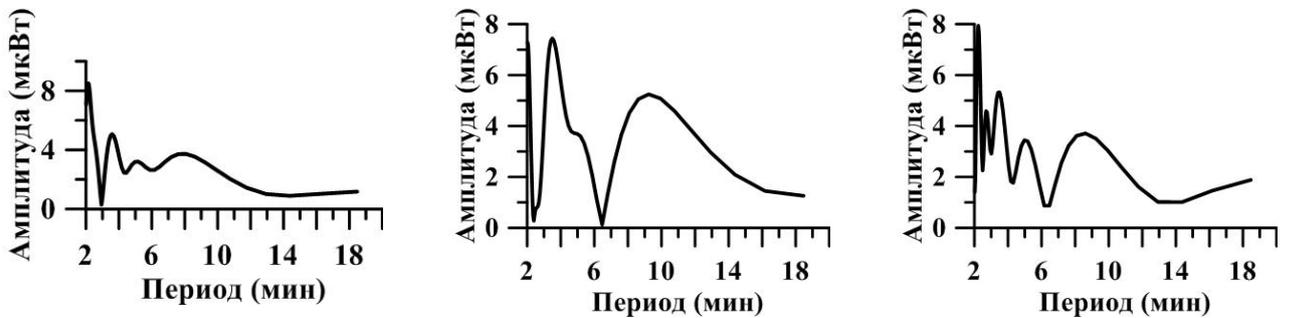
**Рисунок 2.3.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.



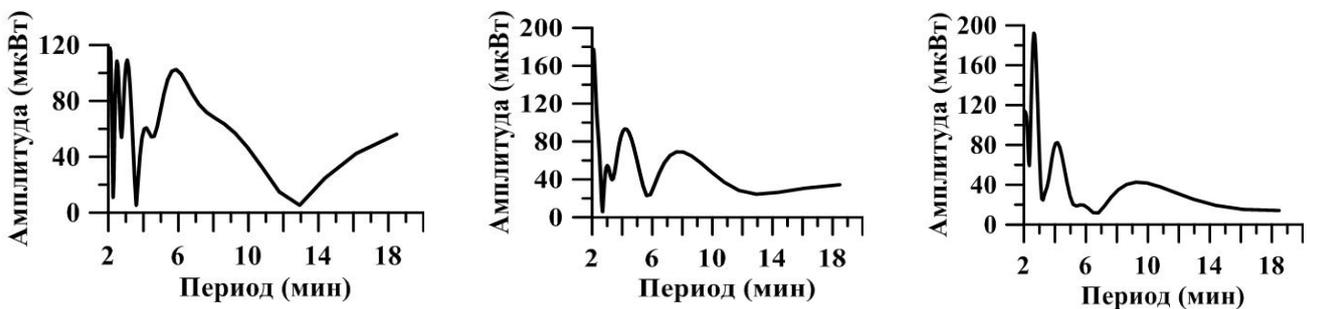
**Рисунок 2.4.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 6 декабря 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.



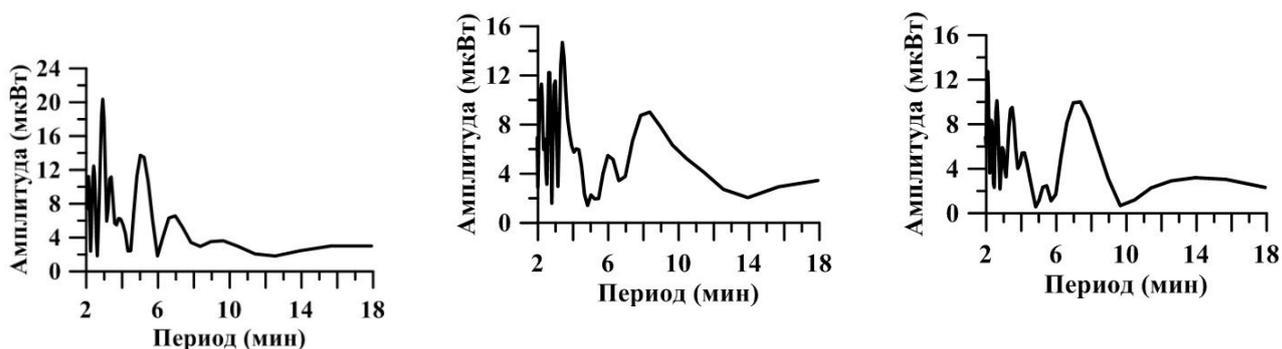
**Рисунок 2.5.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 6 декабря 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.



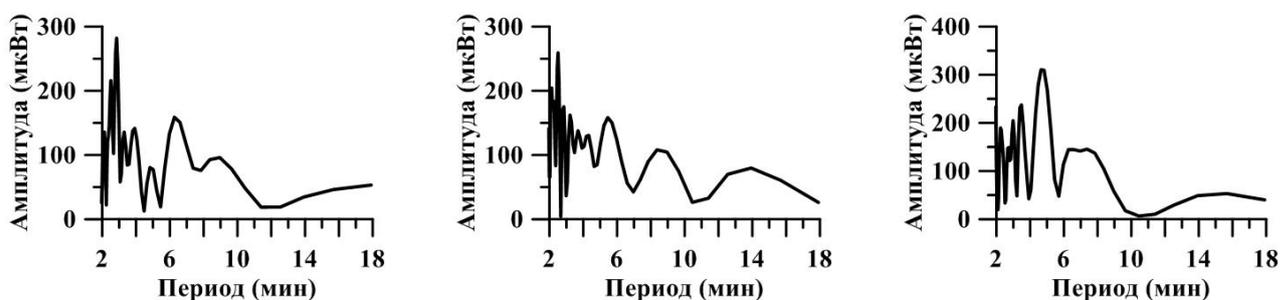
**Рисунок 2.6.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 19 марта 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.



**Рисунок 2.7.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 19 марта 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.



**Рисунок 2.8.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 28 августа 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 НМ.



**Рисунок 2.9.** Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 28 августа 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 НМ.

Анализ выполненных измерений показал, что в период прохождения солнечного терминатора отчетливо проявляется осцилляционный характер изменений характеристик вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала в предвосходной области. В проведенных наблюдениях такие осцилляции наблюдались за полчаса - час до восхода Солнца.

Естественно 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 значительный вклад в вариации лидарного сигнала вносят гармоники с периодами 2-10 мин. Прохождение СТ сопровождается усилением амплитуд вариаций акустических

составляющих (менее 4 минут) и ВГВ с периодами близкими к периоду Вяйсяля-Брента (6-10 минут).

Результаты наблюдений динамики интенсивности рассеянного лидарного сигнала, выполненные с применением лидара LSA-2с с целью изучения вариаций нижней атмосферы в период прохождения солнечного терминатора представлены в [153, 158, 159].

Сеанс лидарных наблюдений обычно продолжался 4-6 часов и захватывал время прохождения СТ. Для оценки изменения 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 и коротких ВГВ.

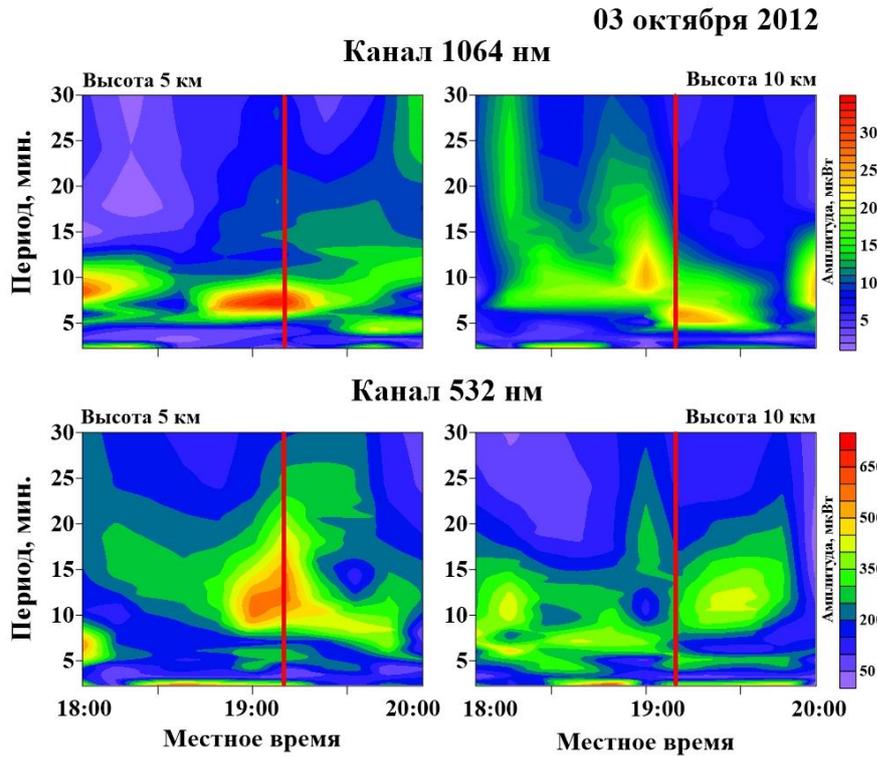
На рисунках 2.10-2.13 показаны временные изменчивости спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в Калининграде на высотах 5, 10 км в наблюдениях, выполненных в 2012-2014 годах в разные времена года и включающих прохождение утреннего и вечернего СТ над Калининградом. В анализе наблюдений основное внимание уделялось выделению вариаций с периодами от 2 до 20 мин, вызванных распространением АГВ и короткомасштабных ВГВ.

Измерения 3 октября 2012 года были выполнены в период прохождения вечернего солнечного терминатора (рис.2.10). В анализе вариаций Рассмотрены вариации параметров атмосферы на высотах 5 и 10 км. Время захода Солнца 19:10 местного времени. В дневное время отмечается присутствие в нижней атмосфере вариаций с периодами менее 2-3 минуты и 6-10 минут, что

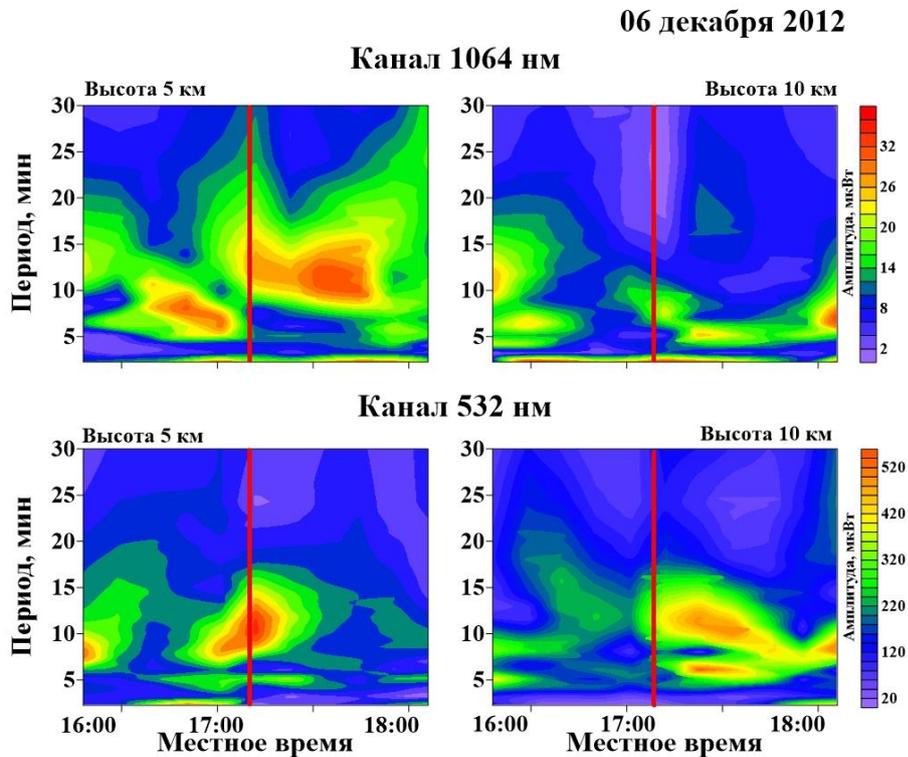
соответствует АГВ и ВГВ в нижней атмосфере. После прохождения СТ наблюдается понижение амплитуд интенсивности вариаций параметров атмосферы с периодами менее 2-3 минут. Аналогичные эффекты при прохождении вечернего СТ отмечаются в наблюдениях, выполненных 6 декабря 2012 года.

На рисунке 2.11 показаны результаты анализа наблюдений, выполненных 6 декабря 2012 года с 16:00 до 18.00 местного времени (время прохождения СТ – 17:10). В вариациях параметров атмосферы наблюдаются гармоника с периодами АГВ и ВГВ, а также наблюдается понижение амплитуд гармоник через полчаса после прохождения СТ. В наблюдениях 28 августа 2012 года (рис.2.13, время прохождения СТ в Калининграде 20:29) и 2 сентября 2014 года (рис.2.15, время прохождения СТ – 20:28), как и во всех предыдущих исследованиях вечернего СТ, наблюдаются вариации с периодами менее 3 минут и с периодами 4-10 минут, что соответствует периодами АГВ и ВГВ в тропосфере.

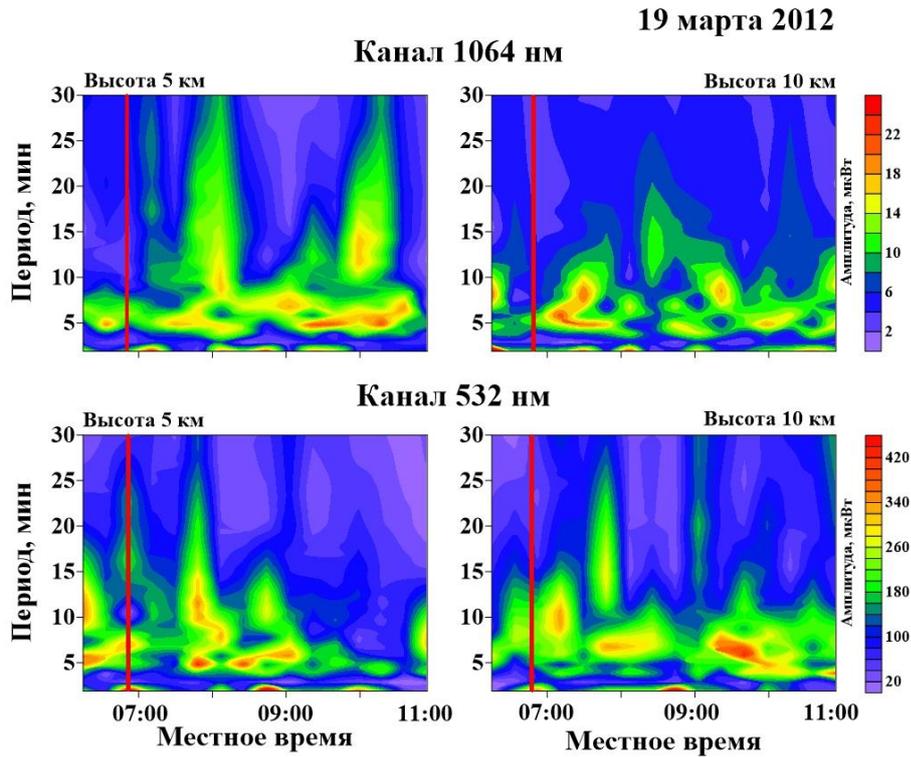
На рисунках 2.12 и 2.14 показаны наблюдения утреннего СТ выполненные 19 марта 2012 года и 18 ноября 2013 года. В наблюдениях 19 марта 2012 года отмечается резкое увеличение амплитуд с периодами менее 3 минут. Особенно это проявляется в наблюдениях на канале 532 нм на рассматриваемых высотах. Также в наблюдениях отмечается присутствие вариаций с периодами 4-10 минут. В наблюдениях 18 ноября 2013 года наблюдается усиление амплитуд гармоник с периодами ВГВ в период прохождения СТ. Амплитуды гармоник с периодами АГВ усиливаются за полчаса до прохождения СТ.



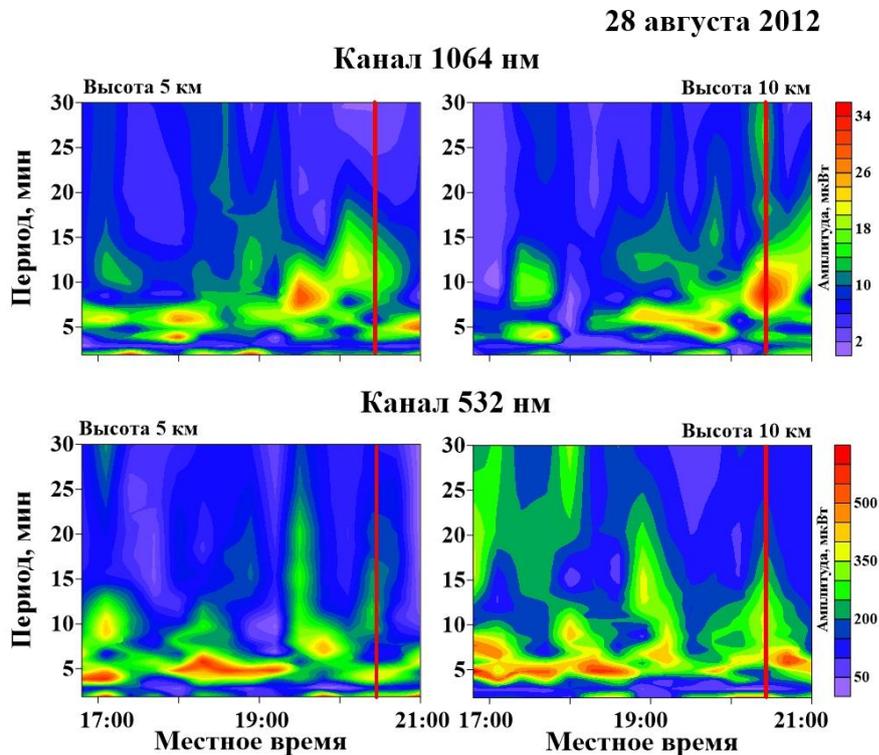
**Рисунок 2.10.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 3 октября 2012 года.



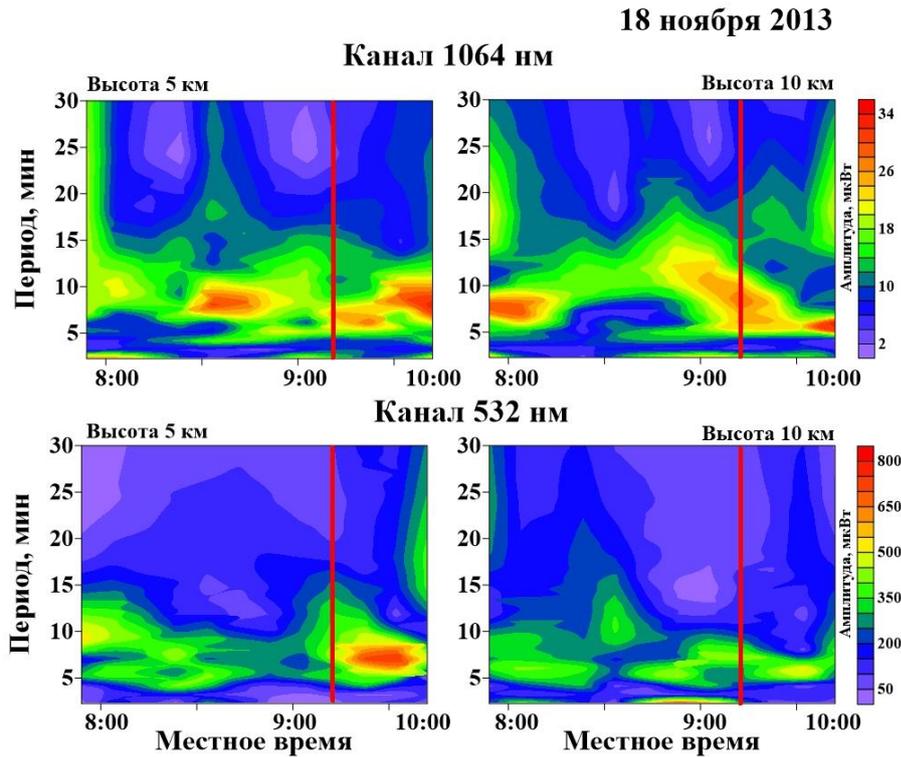
**Рисунок 2.11.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 6 декабря 2012 года



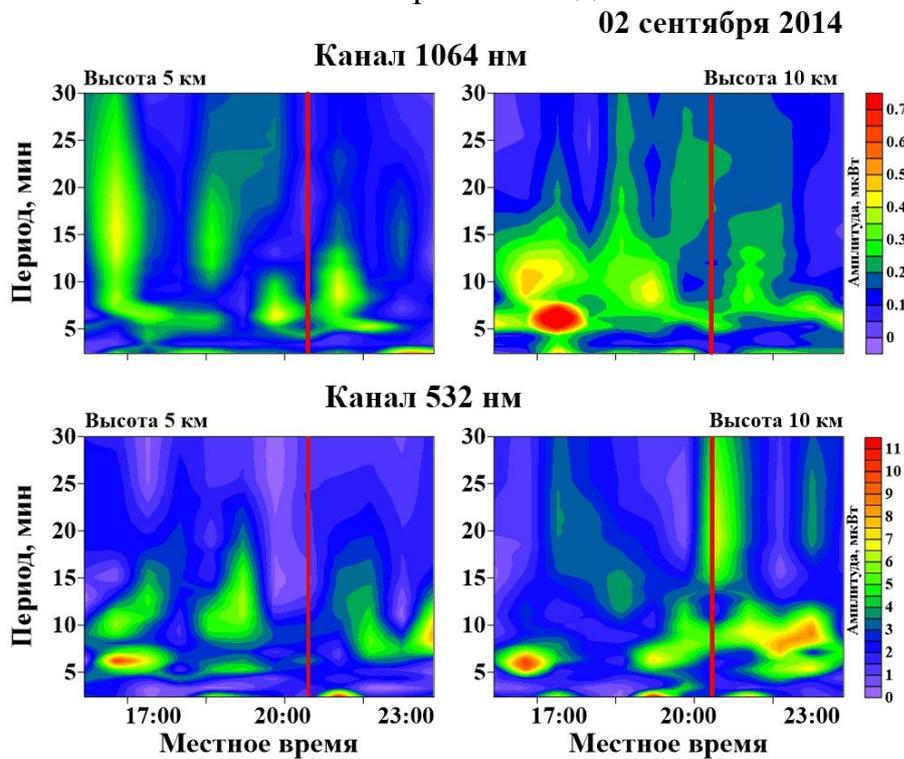
**Рисунок 2.12.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 19 марта 2012 года



**Рисунок 2.13.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 28 августа 2012 года



**Рисунок 2.14.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 18 ноября 2013 года



**Рисунок 2.15.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 2 сентября 2014 года

Как показали результаты анализа наблюдений, в период прохождения утреннего СТ наблюдается усиление вариаций параметров атмосферы с периодами АГВ и ВГВ. Полученные результаты могут служить экспериментальным подтверждением генерации АГВ и ВГВ солнечным терминатором.

В период с 2011 по 2016 год было выполнено 15 серий наблюдений для определения вариаций параметров атмосферы в разные сезоны года. Во всех наблюдениях нижней атмосферы прохождения СТ над пунктом наблюдения сопровождаются увеличением/уменьшением амплитуд вариаций параметров атмосферы с периодами 2-4 минуты и 6-10 в период прохождения утреннего/вечернего СТ. 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 Вайсяля-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. Характерно, что величина этого запаздывания растет с высотой [158, 159].

### **2.3. Исследование вариаций ионосферы в период прохождения солнечного терминатора по наблюдениям сигналов навигационных спутников**

Наблюдения вариаций ионосферных параметров в периоды прохождения солнечного терминатора занимают важное место в ионосферных исследованиях и имеют длительную историю. Как известно, солнечный терминатор является источником генерации атмосферных волн в широком диапазоне периодов. В 70-90 –х годах наблюдения ионосферных возмущений в периоды прохождения СТ

выполнялись, главным образом, на наземных станциях методами вертикального и наклонного зондирования. Важным для нашего исследования недостатком таких наблюдений являлось низкое временное разрешение измерений, что делало невозможным выделение волновых вариаций с малыми периодами. В наших исследованиях изучению АГВ на различных высотах атмосферы уделяется основное внимание, поскольку предполагается определить характеристики волн способных распространяться из нижней атмосферы в верхнюю, и влиять на состояние ионосферы. Наибольший интерес в этих исследованиях представляют АГВ и короткомасштабные ВГВ с периодами близкими к периоду Вейселя-Брента, которые, согласно теоретическим представлениям, могут распространяться практически вертикально и достаточно быстро достигать высот верхней атмосферы [160-162].

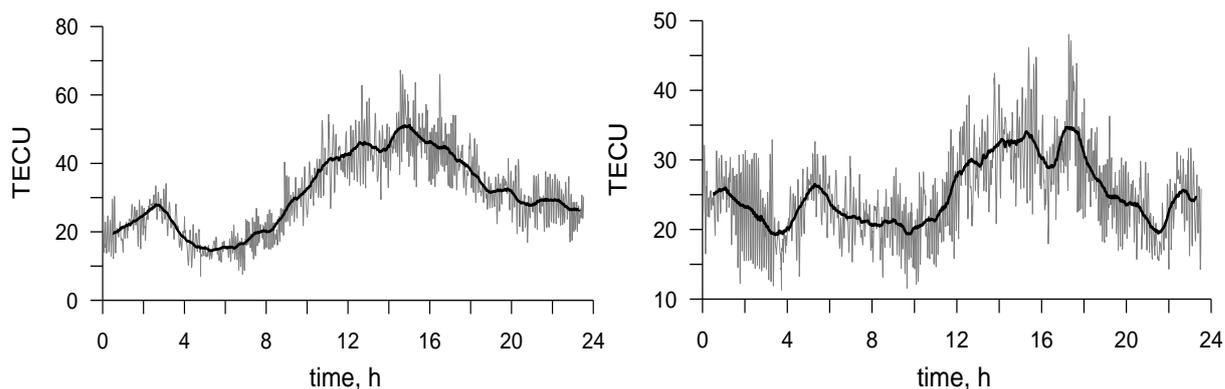
В настоящее время основной объем экспериментальных данных наблюдений ионосферы основывается на методах приема сигналов навигационных спутников GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) [111-117, 163, 164]. Использование сигналов навигационных спутников является в настоящее время наиболее эффективным и перспективным средством дистанционной диагностики ионосферы из всех радиофизических методов. Измерения параметров трансionoсферных радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками, обеспечивают получение информации о структуре и динамике ионосферы в планетарном масштабе. Использование таких измерений имеет целый ряд преимуществ по сравнению с классическими радиофизическими средствами зондирования ионосферы – действительная непрерывность, высокое пространственно-временное разрешение и глобальность мониторинга ионосферных возмущений различной природы. Метод диагностики ионосферы с помощью спутниковых радиосигналов является наиболее экономичным, так как основывается на уже существующей космической и наземной инфраструктуре навигационных систем. Перспективность использования метода

радиопросвечивания ионосферы на основе применения сигналов глобальных навигационных систем базируется на развитии и расширении космического сегмента за счет реализации проектов GALILEO и ГЛОНАСС, что создаст исключительные предпосылки для повышения точности контроля состояния ионосферы и, как следствие, выделения ионосферных эффектов, связанных с динамическими процессами в нижней атмосфере [165].

Очевидно, что исследование вариаций параметров ионосферы в период прохождения СТ имеет важное значение для понимания физических механизмов, обеспечивающих взаимодействие различных атмосферных слоев. Применение методов исследований ионосферы на основе приема сигналов навигационных спутников позволяет существенно расширить возможности анализа пространственных и частотных характеристик вариаций ионосферы. Регулярность возмущений, создаваемых СТ позволяет тестировать развиваемые методики анализа наблюдений с целью выделения вкладов АГВ и короткомасштабных ВГВ.

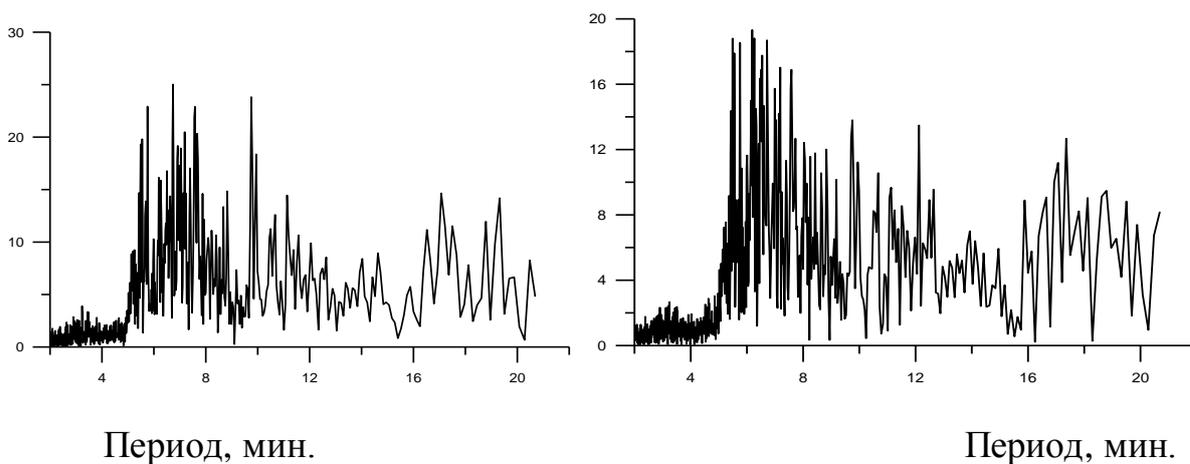
В наблюдениях сигналов навигационных спутников определяется ионосферный параметр ПЭС (Полное Электронное Содержание). Методика определения ПЭС по наблюдениям сигналов спутников ГНСС представлена в работе [166].

Данные о вариациях ПЭС получены по наблюдениям станции Калининград с использованием станции приема сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС Leica-1200. На рисунке 2.16 показаны примеры суточных вариаций ПЭС, полученные в наблюдениях. Поскольку наибольший интерес вызывает высокочастотная составляющая вариаций ПЭС (периоды 5-20 минут) в работе анализируются спектр вариаций разности суточных вариаций ПЭС, определенных по наблюдениям с шагом по времени 30 секунд, и средних значений, полученных с окном сглаживания 1 час.



**Рисунок 2.16.** Суточные вариации ПЭС слева 12.02.2012, справа 19.03.2012. Серая линия - наблюдения ПЭС с разрешением 30 сек., Черная линия - сглаженные наблюдения с окном сглаживания 1ч.

Пример спектра вариаций ПЭС для периода прохождения СТ (8-10 часов утра по местному времени) приведен на рисунке 2.17.

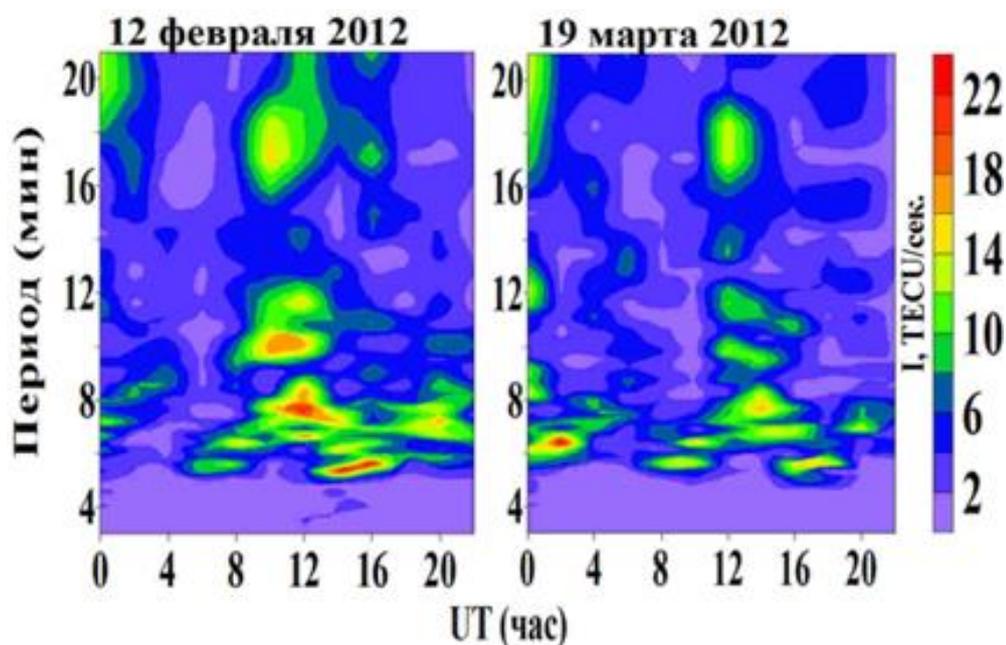


**Рисунок 2.17.** Спектры вариаций ПЭС слева для 12.02.2012, справа для 19.03.2012

Как видно из рисунка 2.17., основной вклад в высокочастотную составляющую изменчивости суточных вариаций ПЭС вносят гармоники с периодами 5-8 мин. Результаты анализа спектров атмосферных (см. п.2.2.) и ионосферных вариаций полученных по наблюдениям, выполненным в один и тот же период времени, выявляют наличие гармоник с одинаковыми периодами (5-7

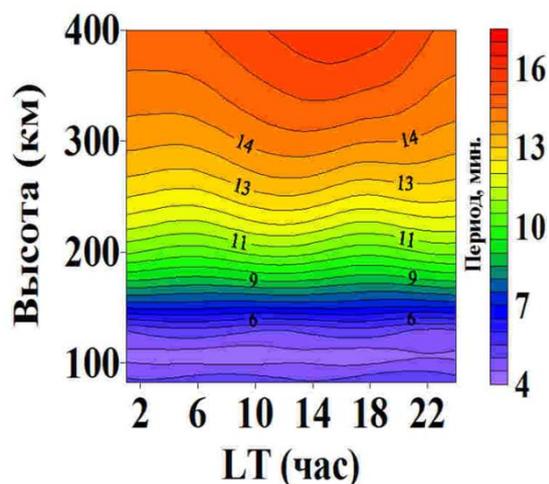
минут). Это позволяет предположить, что вариации с такими периодами имеют один источник возбуждения.

Предположение о взаимосвязи возмущений в области солнечного терминатора в нижней атмосфере и ионосфере основывается на наблюдаемой локализации ионосферных возмущений с периодами 5-7 минут в утренние и вечерние часы. На рисунке 2.18 показан пример изменений спектра ионосферных вариаций с периодами 2-20 мин. в течение суток. На рисунке отчетливо прослеживается область утреннего и вечернего терминаторов и смещение этих областей, связанное с изменением времени восхода и захода солнца. Из рисунка 2.18 видно, что гармоники с периодами  $\sim 5$  мин. наблюдаются только утром и вечером. Гармоники с большими периодами наблюдаются в течение всего дневного времени [153].



**Рисунок 2.18.** Изменение спектра вариаций ПЭС с периодами 2-20 мин в течение суток.

На рисунке 2.19 представлено вертикальное распределение частоты Вайсяля-Брента и ее изменение в течение суток, рассчитанное с использованием эмпирической модели NRL-MSISE-00 [93, 167].



**Рисунок 2.19.** Изменение частоты Вайсяля-Брента по данным модели MSIS.

Как следует из результатов наблюдений (рис. 2.17-2.18), наибольший вклад в высокочастотные вариации ионосферы вносят гармоники с периодами, соответствующими АГВ.

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.

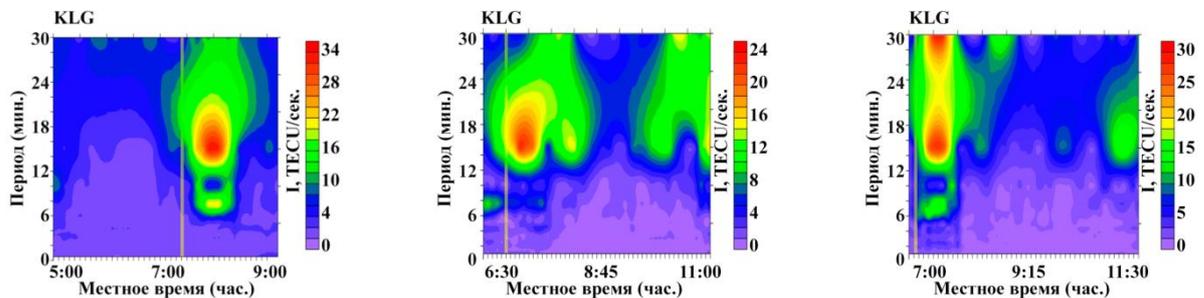
Согласно теоретическим оценкам [22], вследствие рефракции АГВ в атмосфере на ионосферные высоты возможно только при небольших углах отклонения от вертикали ( $\sim 20^\circ$ ). Поэтому, для выявления вкладов АГВ и короткомасштабных ВГВ по наблюдениям навигационных спутников предложена более точная процедура определения частотных характеристик вариаций ПЭС и временной диапазон их появления в точке наблюдения.

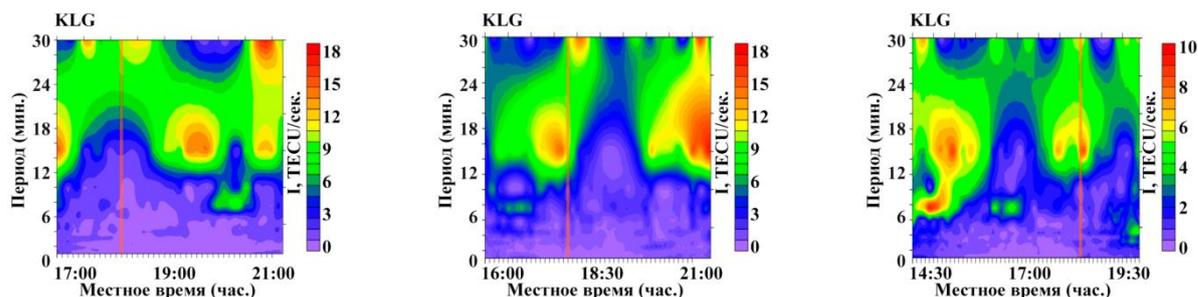
Поскольку суточная ПЭС вариация получается посредством осреднения ПЭС по достаточно большой пространственной области ионосферы (радиус около 1000 км), то более детальную картину изменения ПЭС можно проследить в вариациях ПЭС вдоль пролетов отдельных спутников.

Алгоритм методики определения частотных характеристик вариаций ПЭС можно разделить на ключевые пункты:

1. Отбор спутников, период наблюдения которых приходится на прохождение солнечного терминатора;
2. Сбор данных о вариациях ПЭС, времени пролета спутника и траектории его движения;
3. Вычисление дифференциального ПЭС по наблюдениям. Анализ дифференциального ПЭС обычно используется для выделения высокочастотных составляющих вариаций;
4. Расчет изменений спектра вариаций дифференциального ПЭС в период наблюдений спутника. Спектр вариаций ПЭС определялся с применением методов оконного преобразования Фурье (аналогичного при обработке наблюдений в нижней атмосфере) с длительностью окна 1 час, и сдвигом по времени 15 минут в течение всего периода наблюдений;
5. Графическое представление результатов анализов.

На рисунке 2.20 представлены результаты проведенного анализа для наблюдений сигналов отдельных спутников GPS, полученных на станции Калининград в период прохождения СТ 1 марта 2010 г.





**Рисунок 2.20.** Спектр вариаций полного электронного содержания 1 марта 2010 г.

Как видно из рисунка 2.20 в период прохождения утреннего СТ отмечается усиление гармоник с периодами ВГВ близкими к периоду Вяйсяля-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  $\sim 0.5$  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.

В целом, 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 (100 - 400 километров). Отсутствие этих колебаний в ночное время может быть связано с особенностью распространения

АГВ в верхней атмосфере. Так в [21, 94] показано, что для акустико-гравитационных волн с периодами меньше периода Вайсяля-Брента в верхней атмосфере возможно волноводное распространение. Причем высота верхней границы волновода определяется высотой области диссипации акустико-гравитационных волн (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 акустико-гравитационные волны 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 акустико-гравитационных волн 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.

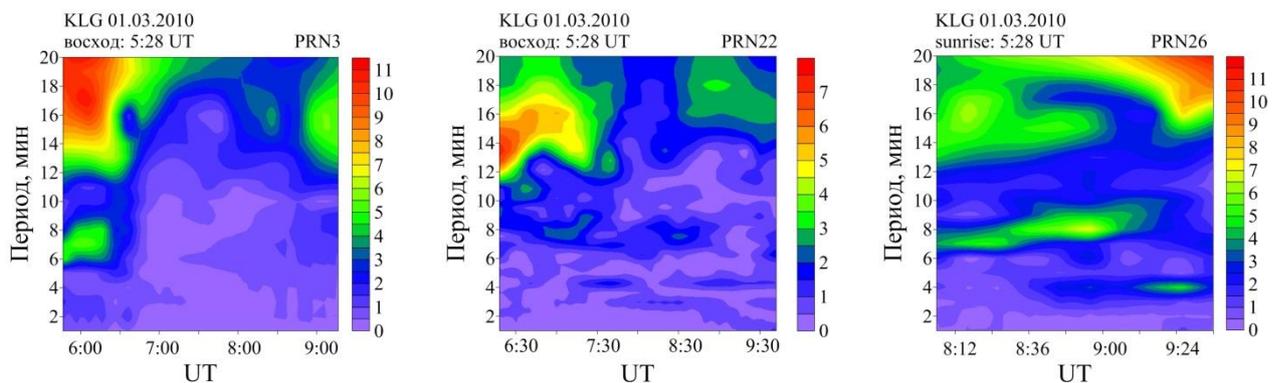
На рисунках 2.21-2.30 показаны изменения спектров вариаций ПЭС в периоды прохождения СТ, полученные в наблюдениях станций Прибалтийского региона. Были рассмотрены вариации ПЭС на станциях: LAMA (53°53' с.ш. 20°40' в.д.), г. Ольштын, Польша; RIGA (42°33' с.ш. 23°23' в.д.), г. Рига, Латвия; VLNS (40°38' с.ш. 16°42' в.д.), г. Вильнюс, Литва; KLGD (54°42' с.ш. 20°27' в.д.), город Калининград, Россия.

В анализе наблюдений сигналов отдельных спутников GPS были выделены вариации ПЭС с периодами АГВ и ВГВ, что позволило более детально представить динамику этих вариаций в период наблюдений. Наблюдения выполнены в марте 2010, феврале и октябре 2011 года в периоды прохождения утреннего и вечернего терминаторов.

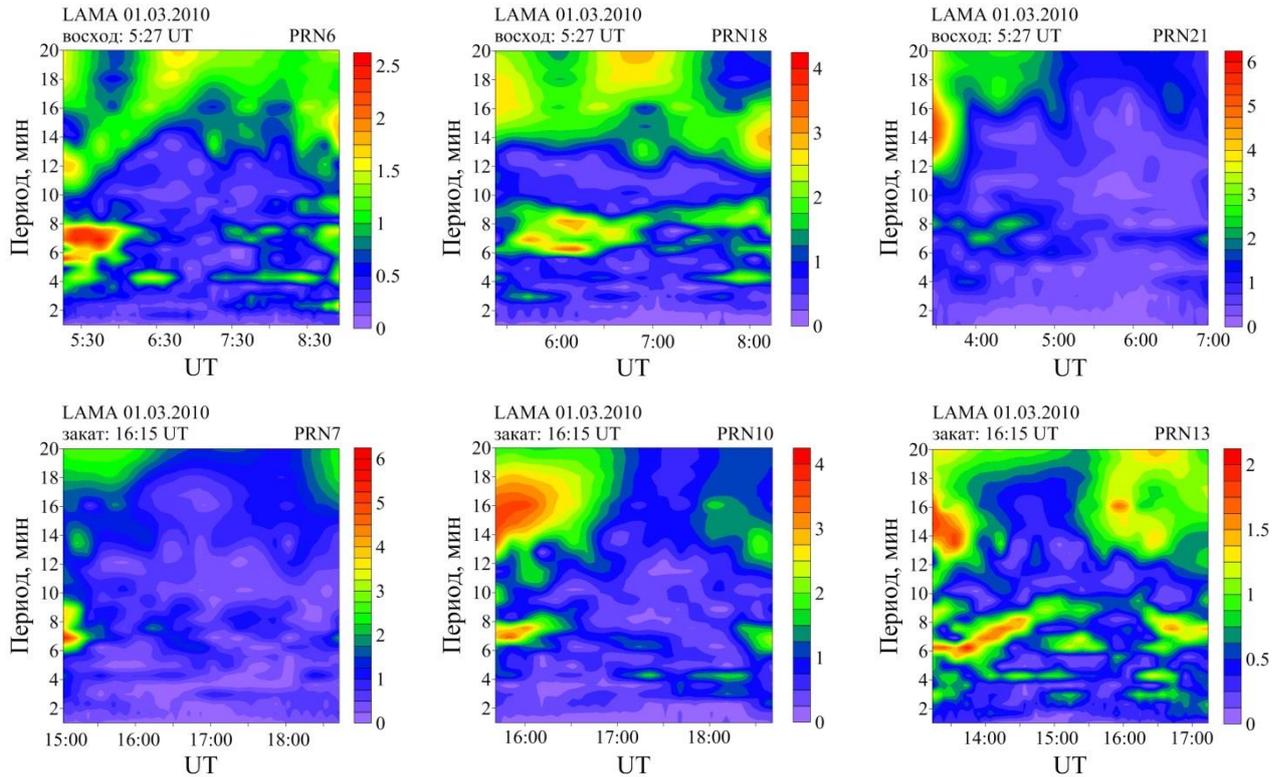
Программа расчета изменения спектра вариаций параметров ионосферы в наблюдениях сигналов отдельных спутников глобальных навигационных систем

"DSTEC" (dynamical spectrum of total electron content) – система обработки результатов и расчета спектральных характеристик вариаций полной электронной концентрации на трассе «спутник - станция приема сигналов». Программа "DSTEC" представляет собой программно-реализованный алгоритм, разработанный с использованием MathCAD, для обработки сигналов навигационных спутников. Программа "DSTEC" может применяться, как инструментальная интегрированная среда, для анализа вариаций параметров верхней атмосферы и ионосферы и определения спектральных характеристик АГВ и ВГВ по данным ПЭС, полученным в наблюдениях сигналов навигационных спутников. Программа имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617118.

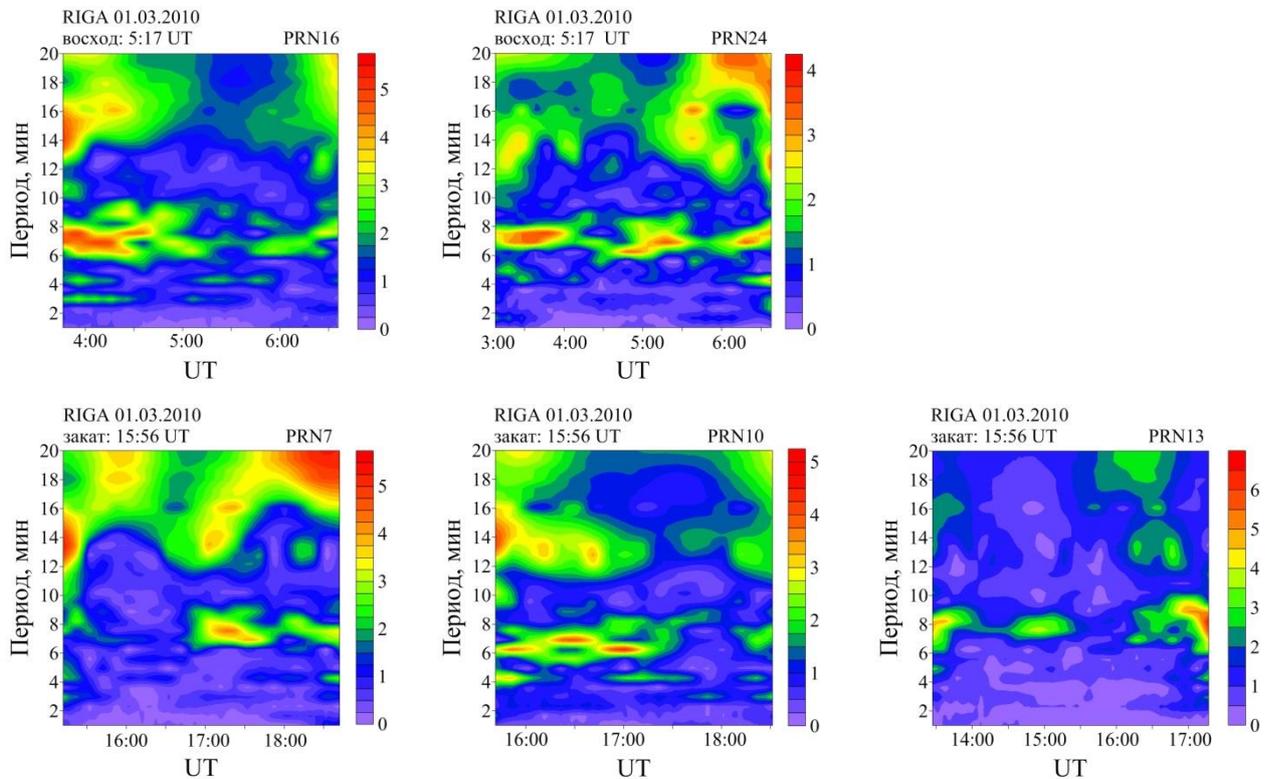
Как видно из рисунков, характерной особенностью изменений спектров является усиление гармоник с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ перед прохождением СТ и после прохождения продолжающиеся в течение ~ 1.5-2 часов. Как видно из рисунков, повышение амплитуд составляющих вариаций ПЭС с периодами 6–10 минут отмечается в освещенной области ионосферы – после прохода утреннего и перед проходом вечернего терминатора.



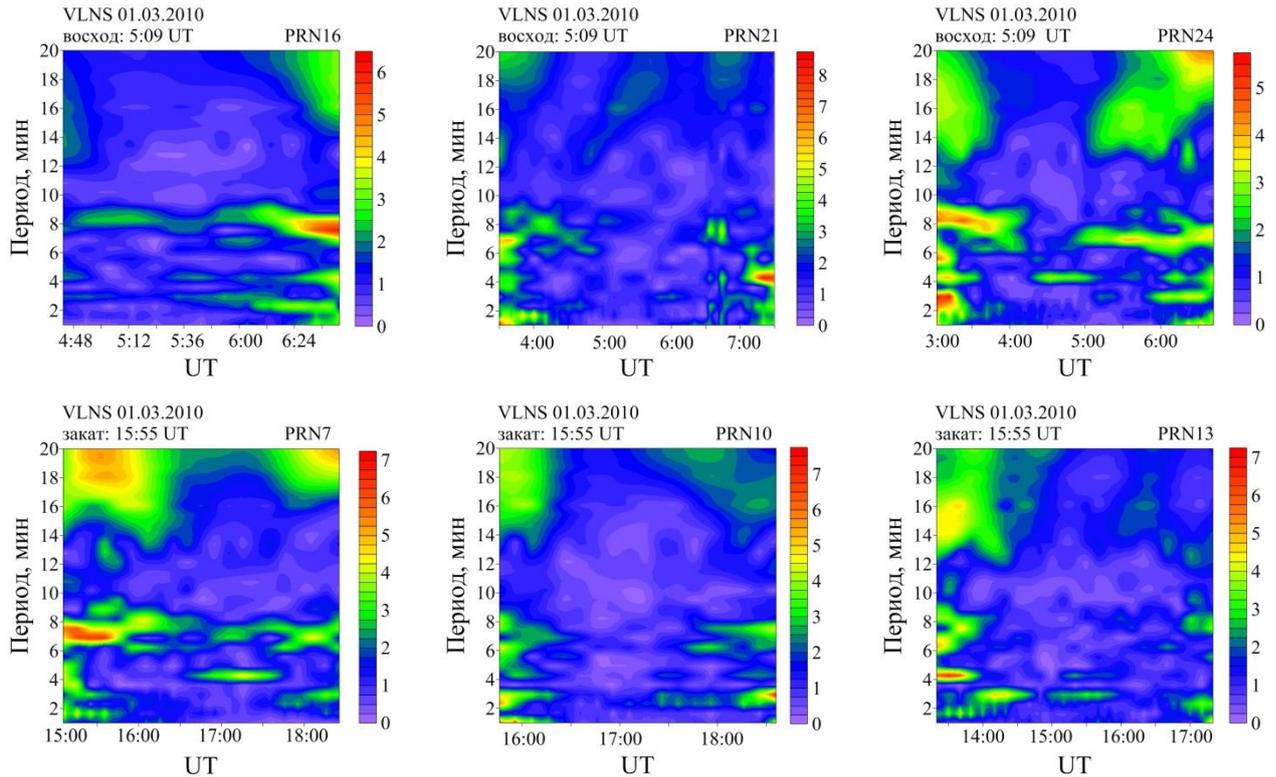
**Рисунок 2.21.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего СТ



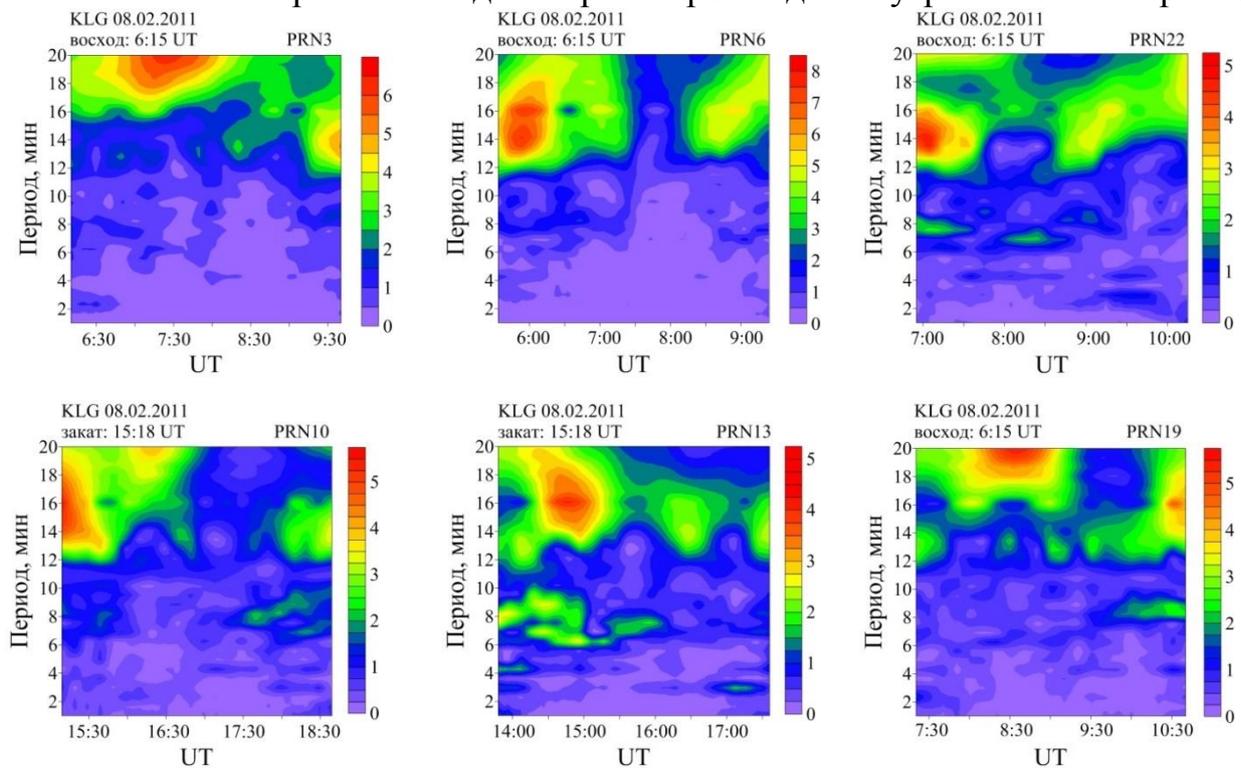
**Рисунок 2.22.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Олыштын 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



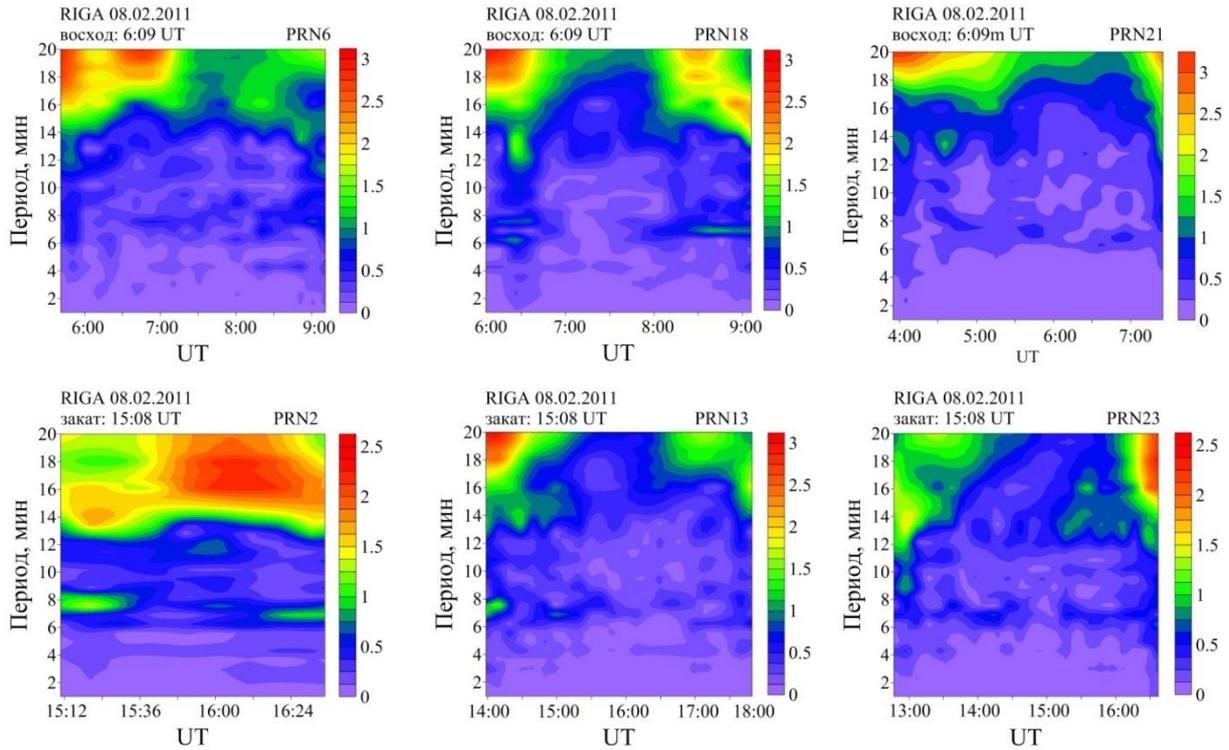
**Рисунок 2.23.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



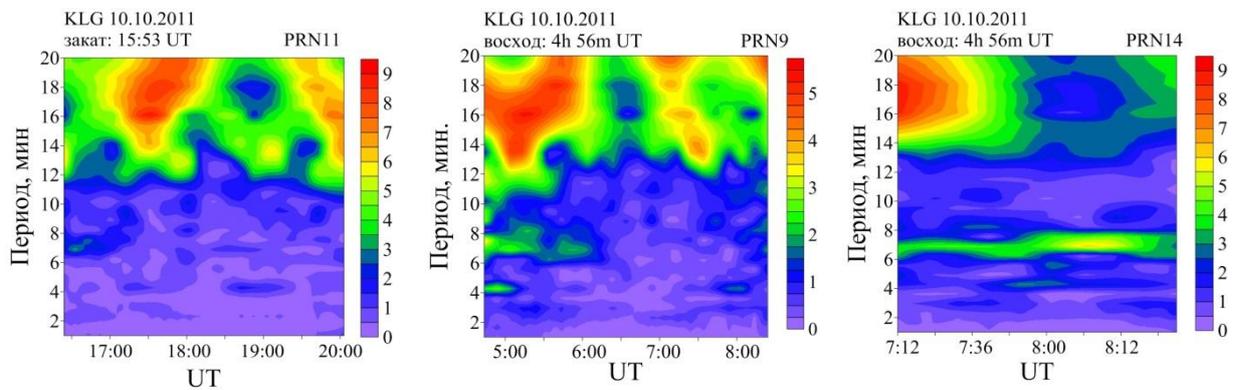
**Рисунок 2.24.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Вильнюс 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



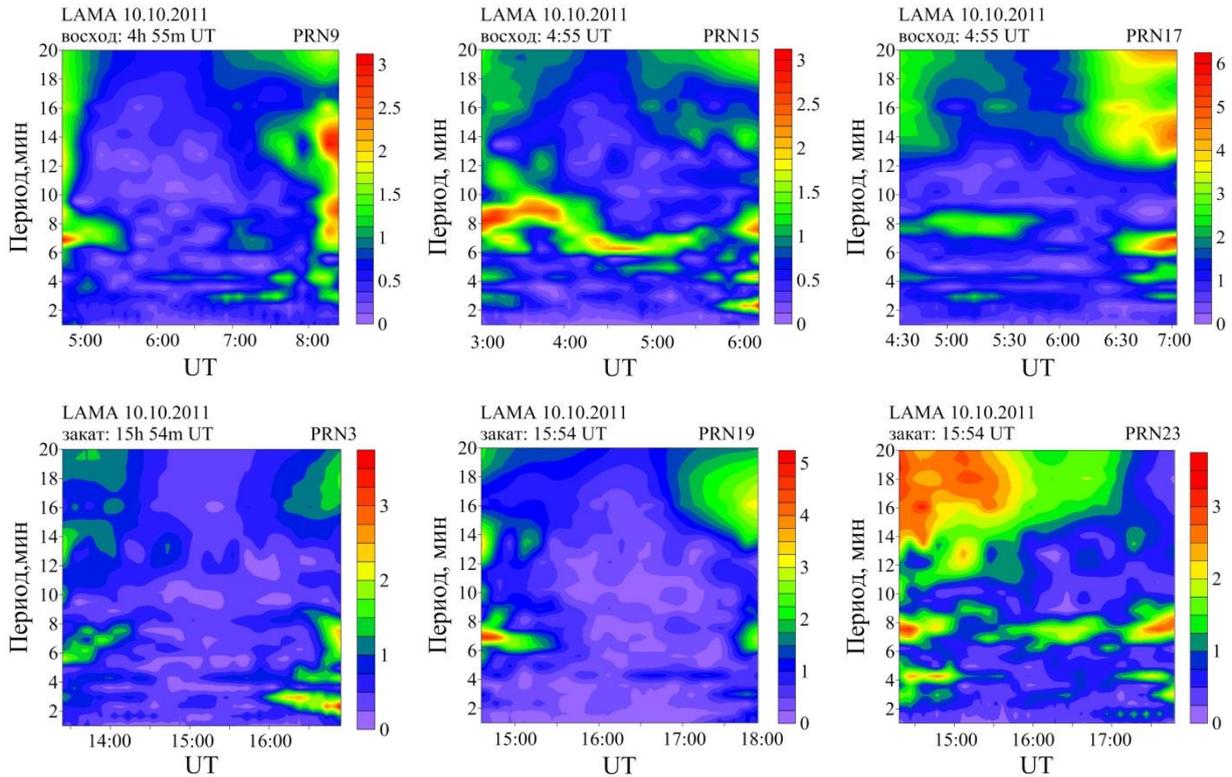
**Рисунок 2.25.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 8 февраля 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



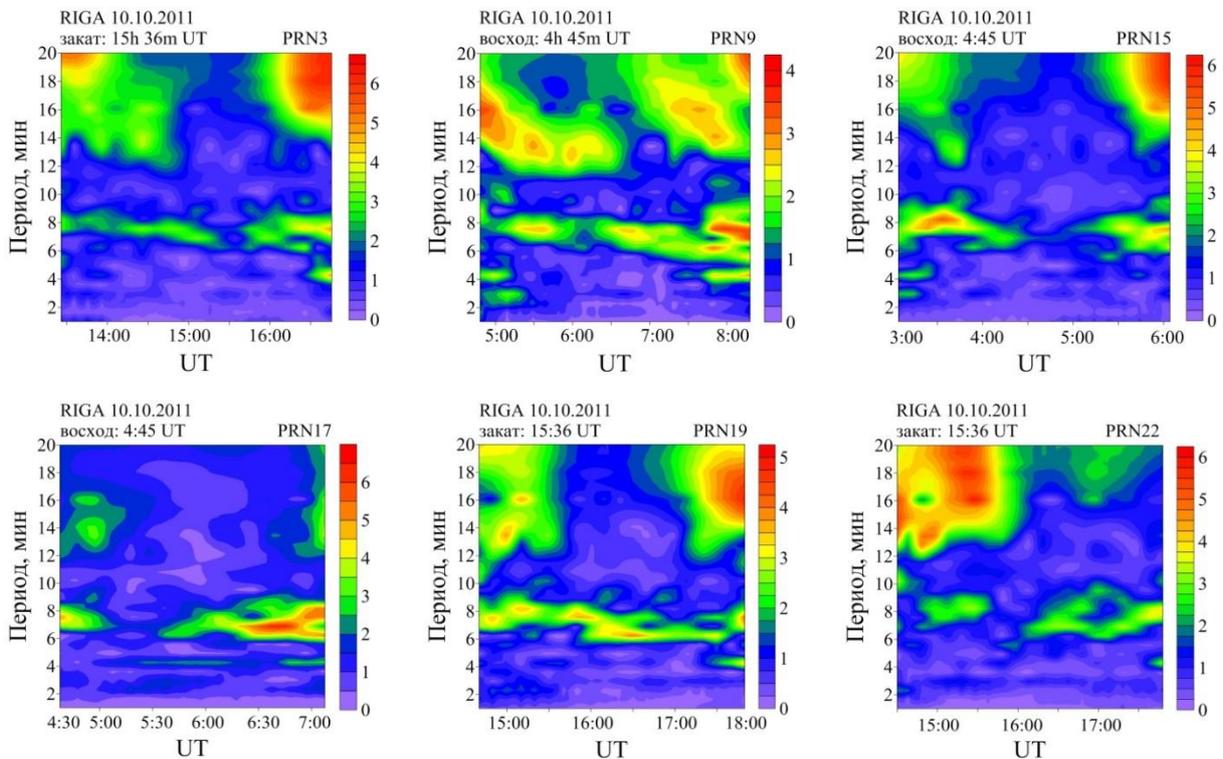
**Рисунок 2.26.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 8 февраля 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



**Рисунок 2.27.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 10 октября 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ

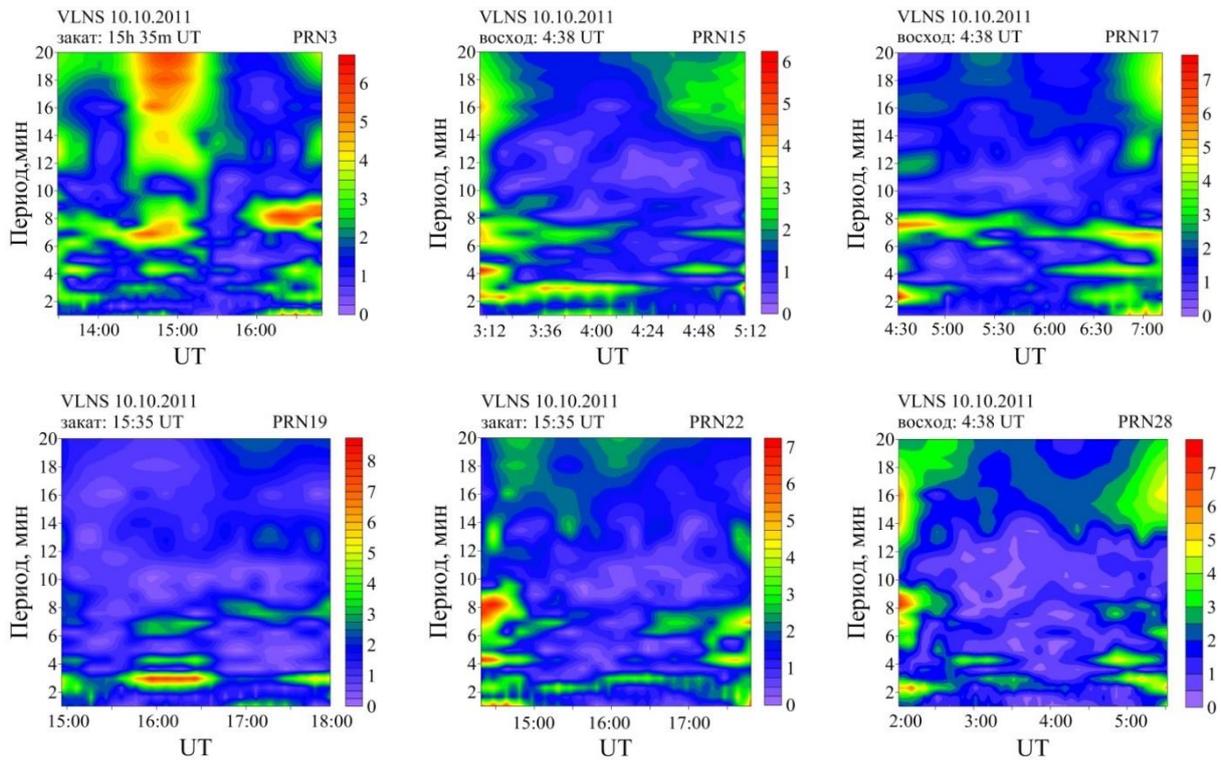


**Рисунок 2.28.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Олыштын 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ



**Рисунок 2.29.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ

## СТ



**Рисунок 2.30.** Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Вильнюс 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ

На основе проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

- В области солнечного терминатора отмечается усиление волновых возмущений с периодами колебаний, соответствующими АГВ и короткомасштабным ВГВ;
- Составляющие вариаций ПЭС с периодами АГВ, связанные с прохождением СТ проявляются в ионосферных наблюдениях преимущественно в освещенной области;
- Наблюдаемые особенности проявления высокочастотных вариаций в области терминатора могут быть объяснены существованием атмосферного волновода для акустико-гравитационных волн с периодами меньше периода Вэйсяля-Брента в верхней атмосфере.

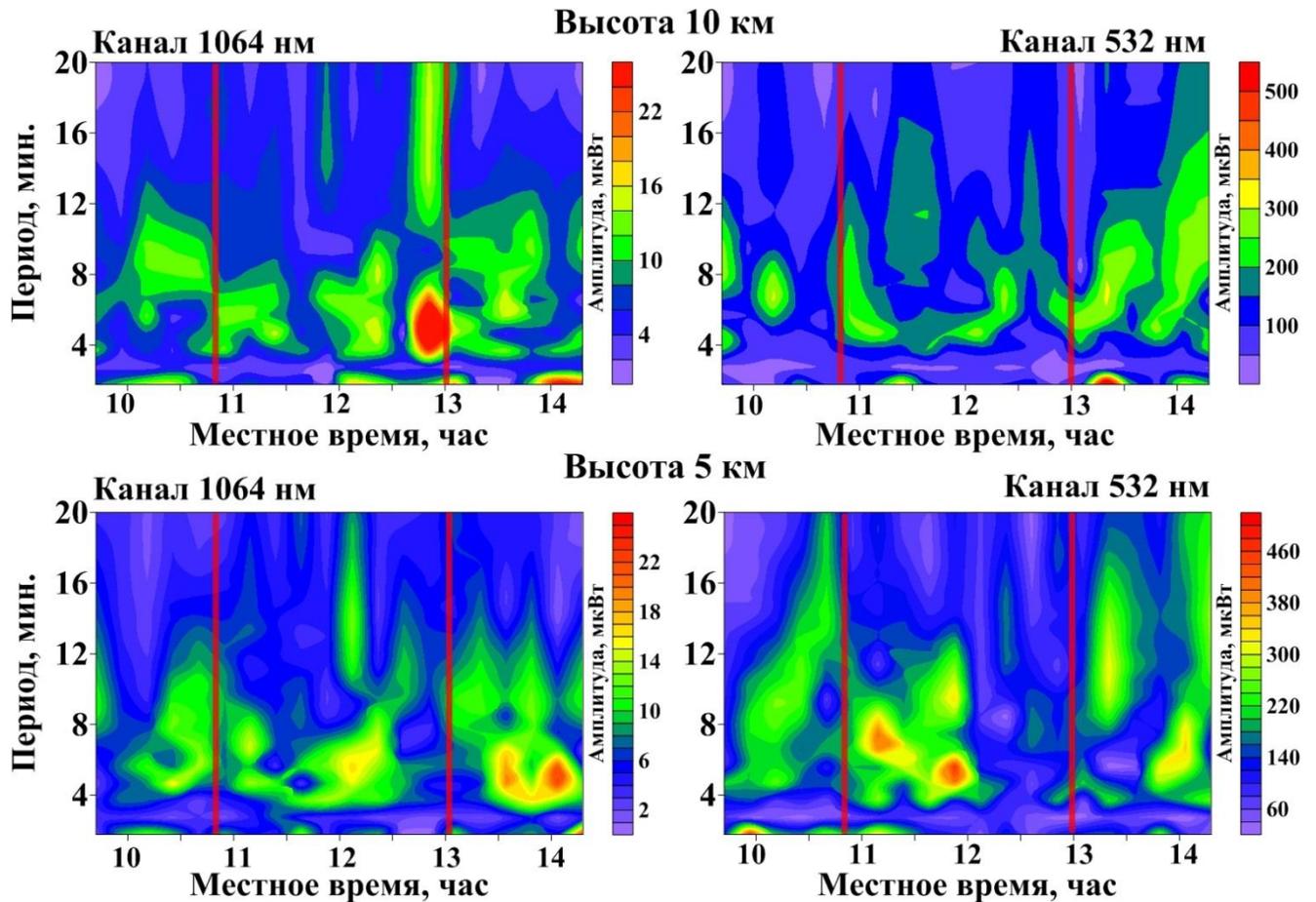
## **2.4. Исследование АГВ в Калининградской области во время солнечного затмения 20 марта 2015 года**

Солнечное затмение является одним из факторов, который влияет на состояние околоземного космического пространства и ионосферы. К тому же солнечное затмение редкое явление, поэтому исследование его воздействия на ионосферу приобретает особую важность. Солнечное затмение представляет особый интерес для исследования процессов генерации и распространения АГВ в атмосфере [108, 109, 117, 144, 168-170].

Частичное солнечное затмение 20 марта 2015 над Калининградом началось в 10:50 местного времени и закончилось около 13:08. В максимальной фазе затмения перекрытие солнечного диска составляло 77%. Наблюдения в нижней атмосфере проводились методом лидарного зондирования с применением двухволнового лидара, излучающего на длинах волн 532 и 1024 нм. В этих наблюдениях определялось изменение со временем интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала, отражающее частотные характеристики вариаций параметров атмосферы на различных высотах в области наблюдений. Данные о динамике ионосферы получены по наблюдениям сигналов навигационных спутников GPS, в которых определялось полное электронное содержание - ионосферный параметр ПЭС на трассе «спутник – станция» приема сигналов. В соответствие с целями работы основное внимание в анализе наблюдений уделялось выделению вкладов АГВ и короткомасштабных ВГВ с периодами 2-18 мин. Для анализа частотных характеристик вариаций наблюдаемых параметров применялись методы гармонического анализа, описанные в предыдущих параграфах и работе [153, 158]. Аналогичный метод ранее успешно применялся для анализа спектров вариаций ионосферных параметров, например в [106].

На рисунках 2.31 показано изменение со временем спектра вариаций рассеянного лидарного сигнала в период затмения. В нижней атмосфере

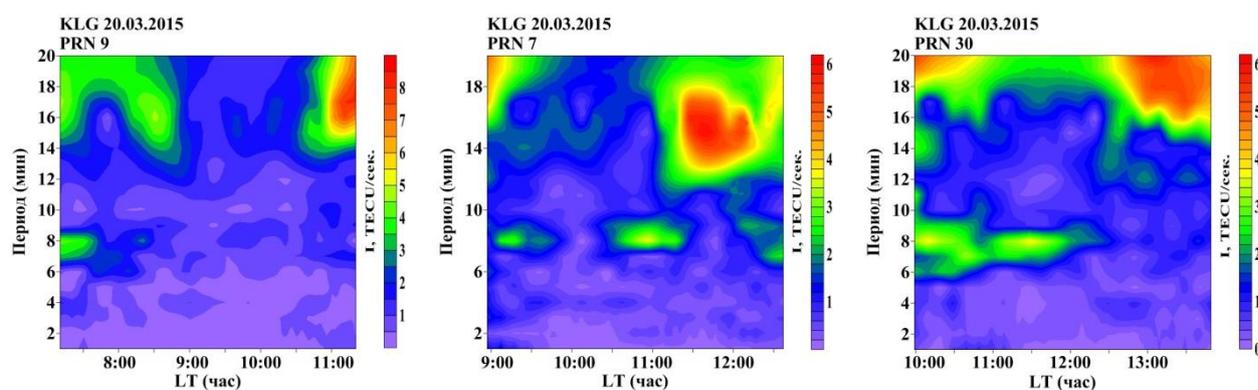
отчетливо проявляется область вариаций с периодами 3-5 мин, амплитуды которых остаются наименьшими в сравнении с амплитудами вариаций с меньшими и большими периодами. Естественно предположить, что верхняя граница этой области определяется периодом Вяйсяля-Брента для ВГВ, а нижняя граница области соответствует периоду акустического обрезания. Таким образом, применяемая методика анализа лидарных наблюдений позволяет разделить акустическую и гравитационную ветви волновых вариаций атмосферы в области наблюдений. 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  $\sim 6$  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  $\sim 0.5$  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.



**Рисунок 2.31.** Спектр вариаций рассеянного лидарного сигнала в период солнечного затмения 20 марта 2015 года на высоте 5, 10 км.

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. Результаты анализа структуры вариаций ионосферного параметра ПЭС в период солнечного затмения, полученные по наблюдениям сигналов отдельных спутников GPS, показаны на рисунке 2.32. Как видно из рисунка 2.32, перед затмением в спектре вариаций ПЭС в исследуемом частотном диапазоне основной вклад вносили гармоники с периодами 16-18 мин

и 6-8 мин. Перед началом затмения отмечается повышение амплитуд гармоник с периодами  $\sim 16-18$  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  $\sim 0.5$  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.



**Рисунок 2.32.** Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS на ст. Калининград в период солнечного затмения 20 марта 2015.

В целом, тенденции в динамике вариаций с периодами ВГВ в верхней и нижней атмосфере, проявляющиеся в понижении амплитуд гармоник при прохождении главной фазы затмения и повышении их перед началом и после окончания затмения, повторяются. Амплитуды вариаций атмосферы с периодами АГВ отчетливо реагируют только на начальную и заключительную фазы затмения. Продолжительность этой реакции, проявляющейся в понижении амплитуд, не превышает 0.5 час. В течение главной фазы затмения, на фоне уменьшения амплитуд гармоник с периодами ВГВ, колебания с периодами АГВ вносят основной вклад в вариации нижней атмосферы. Анализ результатов

ионосферных наблюдений выявляет такие же тенденции в вариациях ионосферного параметра ПЭС. Также как и в нижней атмосфере, в ионосфере в период главной фазы затмения основной вклад в вариации ПЭС вносят колебания АГВ с периодами  $\sim 6$  мин.

Основное внимание в анализе результатов наблюдений уделялось выделению вариаций с периодами 2-20 мин. Такой диапазон периодов вариаций включает как ВГВ, так и АГВ. Таким образом, результаты анализа наблюдений в нижней атмосфере и ионосфере показывают, что прохождение солнечного затмения оказывает существенное влияние на вариации параметров среды с периодами АГВ и короткомасштабных ВГВ.

Согласно результатам теоретических исследований [21, 94, 139, 162], такие волны способны распространяться из нижней атмосферы в верхнюю. В экспериментальных исследованиях [108, 109, 117, 144, 168-170] было показано, что солнечное затмение существенно влияет на процессы генерации АГВ и, по-видимому, впервые были обнаружены такие вариации ионосферы в период прохождения солнечного затмения. Представленные результаты ионосферных наблюдений также подтверждают присутствие АГВ и связь их характеристик с динамикой солнечного затмения. Выполненные наблюдения показывают, что усиление составляющих вариаций с периодами АГВ и ВГВ атмосферных и ионосферных параметров отмечается на начальной и заключительной фазах затмения. Это, очевидно, связано с быстрым изменением потоков солнечного излучения. В нижней атмосфере в рассматриваемом частотном диапазоне основной вклад вносят гармоники с периодами 2-6 мин, а в наблюдениях вариаций ПЭС гармоники с периодами 6-8 мин. Сходные изменения спектральных характеристик вариаций ионосферных и тропосферных параметров отмечены в наблюдениях АГВ при прохождении СТ, что, очевидно, объясняется одинаковой физической природой источников возмущения атмосферы.

## 2.5. Выводы по главе

В главе представлены результаты экспериментальных исследований волновой изменчивости атмосферы в диапазоне периодов АГВ и короткомасштабных ВГВ в периоды прохождения СТ и солнечного затмения, которое происходило над Калининградом 20 марта 2015 г.

Экспериментальные исследования, проведенные в Калининграде в 2010-2016 году показали, что:

1. Повышение амплитуд вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы с периодами 2-10 минут отчетливо прослеживается при прохождении СТ над пунктом наблюдений. Малые амплитуды вариаций атмосферных параметров с периодами 3-5 минут связаны с различием частот акустических и внутренних гравитационных волн.

2. Вариации ионосферного параметра ПЭС с периодами АГВ (6-16 минут) также отчетливо проявляются при прохождении СТ и продолжаются в течение 1-2 часов в освещенной области ионосферы.

3. Проведенное комплексное исследование выявило особенности динамики АГВ и ВГВ в нижней атмосфере и ионосфере в периоды прохождения СТ. Результаты анализа спектров атмосферных и ионосферных вариаций выявляют наличие гармоник с одинаковыми периодами. Это позволяет предположить, что такие вариации могут иметь один источник возбуждения.

4. Особенностью генерации коротких ВГВ утренним и вечерним СТ является наличие небольшого временного запаздывания после прохождения терминатора и усилением волновой активности. Характерно, что величина этого запаздывания растет с высотой. Высокочастотные возмущения связанные с терминатором проявляются в ионосферных наблюдениях только в освещенной области. Наблюдаемые особенности проявления высокочастотных вариаций в области терминатора могут быть объяснены рефракцией при распространении

АГВ и существованием атмосферного волновода для акустико-гравитационных волн с периодами меньше периода Вайсяля-Брента в верхней атмосфере.

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ НА ПАРАМЕТРЫ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ**

Проблема влияния метеорологических явлений на верхнюю атмосферу и ионосферу является актуальной и недостаточно исследованной до настоящего времени. Сложность исследования влияния метеорологических процессов на состояние верхней атмосферы определяется нерегулярным характером возникновения метеорологических возмущений и недостатком знаний относительно роли тех или иных метеорологических параметров в реализации связей процессов в нижней и верхней атмосфере.

В главе представлены результаты исследования сильных метеорологических штормов, произошедших в Калининградской области в 2008-2016 годах и влияние их на ионосферные параметры.

#### **3.1. Влияние метеорологических штормов на ионосферные параметры в Калининграде**

Как известно, метеорологические возмущения являются источником генерации АГВ в атмосфере. Исследования ионосферных возмущений в периоды прохождения метеорологических фронтов выявили усиление вариаций ионосферы с периодами ВГВ [1, 5, 10, 12, 40]. Волновая связь метеорологических и ионосферных возмущений не вызывает сомнений, однако, спектральные характеристики волн, возбуждающихся в таких условиях мало изучены. Для изучения волновых процессов, реализующих связи нижней и верхней атмосферы, необходимы дополнительные исследования с достаточно высоким пространственным и временным разрешением, что позволило бы установить

спектральные характеристики волн. Штормовые метеорологические условия в осенние и весенние периоды являются климатической особенностью Калининградского региона. Это обстоятельство позволило выполнить ряд одновременных наблюдений атмосферных и ионосферных параметров в условиях метеорологических штормов.

В качестве атмосферных метеорологических параметров рассматривались суточные вариации атмосферного давления  $P_0$  на уровне станции и максимальных значений скорости ветра на высоте 10 м за период 3 часа между наблюдениями — параметр FF3. Эти данные получены из архивов погоды в базе данных <http://www.rp5.ru>. Данные о вариациях ионосферы получены в наблюдениях критической частоты F2- слоя ионосферы  $f_oF2$  и ионосферного параметра ПЭС на ст. Калининград ( $54.42^\circ$  с.ш.,  $20.27^\circ$  в.д.). Методики определения критической частоты по наблюдениям ионозонда "Парус А", установленного в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН представлены в [171]. Методика определения ионосферного параметра ПЭС (полное электронное содержание), на основе анализа сигналов навигационных спутников глобальной навигационной системы связи (ГНСС) представлена в работе [166].

Электронная концентрация в максимуме слоя F2 ионосферы является одним из наиболее чувствительных параметров, связанных с изменениями состояния ионосферы (относительная погрешность не превышает 3-5 %). Использование измерений сигналов спутников GPS позволяет восстановить значение полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) вдоль луча приемник-спутник. Параметр ПЭС достаточно точно следит за состоянием ионосферного слоя F2 и его пространственно-временными изменениями, коэффициент корреляции между параметрами ПЭС и  $f_oF2$  может достигать 0.9 [172, 173].

Для уменьшения влияния геомагнитных факторов на вариации параметров ионосферы для изучения выбирались метеорологические возмущения, которые

проходили на фоне спокойных геомагнитных условий. Информация о геомагнитной обстановке в рассматриваемый временной период бралась на сайте мирового центра данных по солнечно-земной физике МЦД в Японии <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

Под геомагнитным спокойным условием объясняется  $\leq 25-35\%$  (в периоды от нескольких часов до 1-2 дней) и  $\leq 15-20\%$  (в периоды примерно 2-30 дней) относительно среднего значения ионосферной изменчивости к метеорологическому воздействию [35].

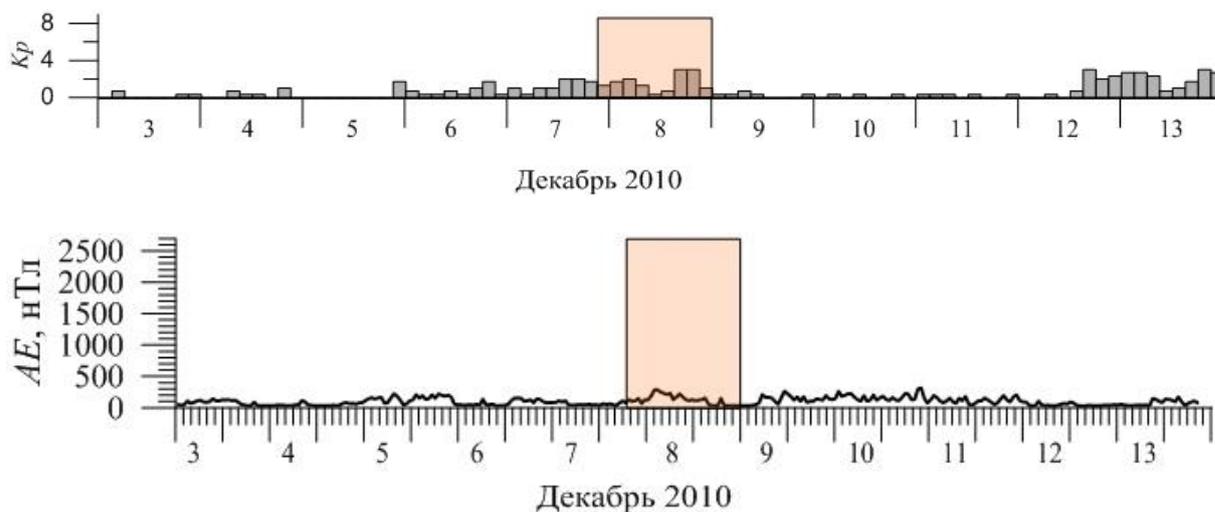
Основное внимание было уделено быстро развивающимся метеорологическим возмущениям, сопровождающимся сильными порывами ветра, достигающими 6-8 баллов по шкале Бофорта. Шкала Бофорта — двенадцатибалльная шкала, принятая Всемирной метеорологической организацией для приближенной оценки скорости ветра по его воздействию на наземные предметы или по волнению в открытом море. Средняя скорость ветра указывается на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью [174]. Как правило, продолжительность таких штормов в Калининградском регионе не превышает двух дней.

С целью выделения характерных особенностей ионосферных возмущений, возникающих в условиях метеорологических возмущений, рассматривался период наблюдений, начинавшийся за пять суток до даты шторма, и оканчивавшийся через 5 суток после его окончания.

На рисунке 3.1 представлены вариации индексов геомагнитной активности (Kp, Ae) за период 3-13 декабря 2010. Метеорологический шторм в Калининградской области наблюдался 9-10 декабря 2010 года. Можно видеть, что геомагнитная активность в течение рассматриваемого периода времени была слабой и слабо изменялась.

Геомагнитная обстановка 3-13 декабря 2010 была относительно спокойной, Kp индекс не превышал значение 3. Непосредственно в дни

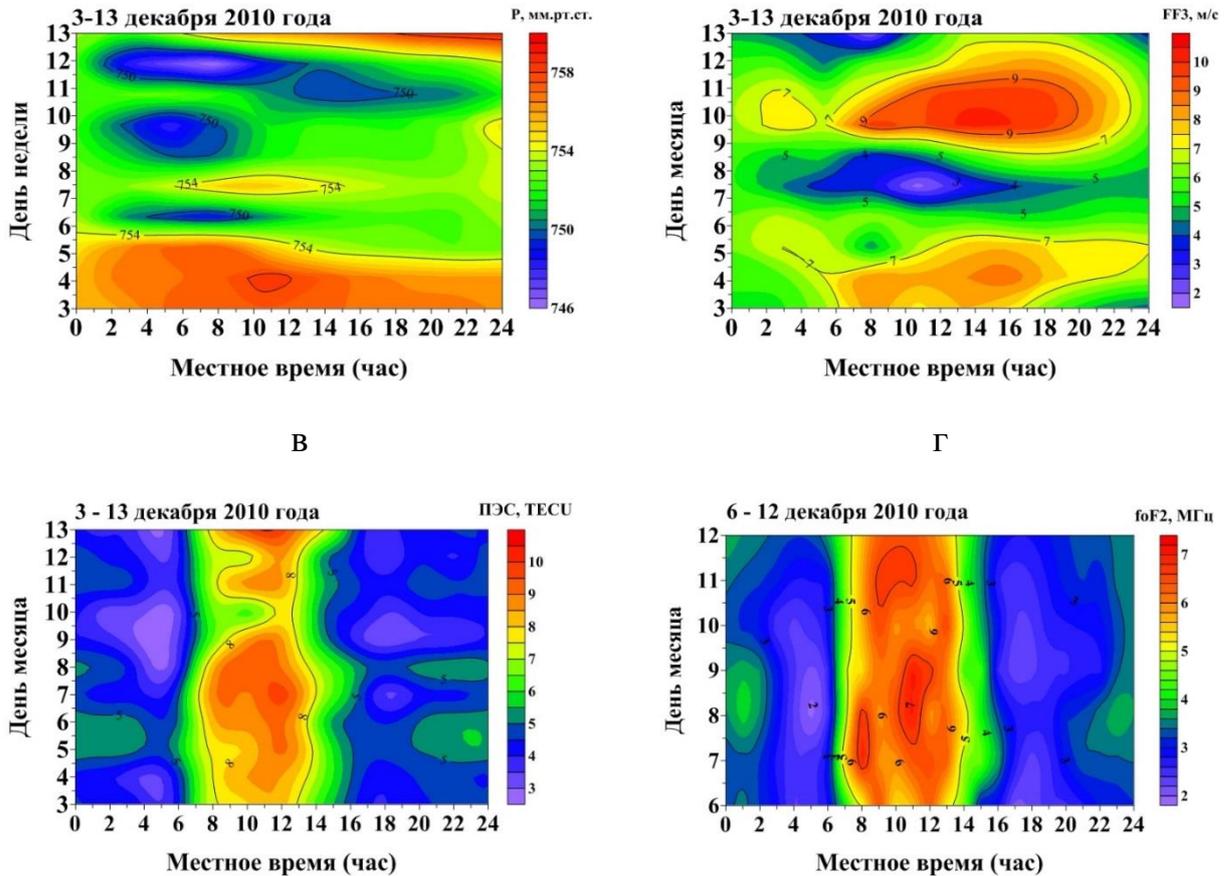
прохождения шторма 9-10 декабря 2010 года, значения  $K_p$  индекса не превышали 1. Солнечная активность в этот период также оставалась спокойной,  $F10.7 = 84$ . Как видно из рисунка 3.2, период пониженного атмосферного давления начался 4 декабря 2010 года и продолжался по 12 декабря. Ветровой режим в приземной атмосфере характеризовался усилением амплитуд порывов ветра на начальной фазе снижения атмосферного давления и, наиболее заметно, 9-10.12.2010, когда амплитуда скорости ветра достигала 13 м/с. Выделенные периоды изменений метеопараметров отчетливо проявляются в вариациях ионосферы. Так в вариациях ПЭС 4-5.12.2010 и 9-10.12.2010 отмечается понижение значений ПЭС, достигающее ~30-40% для дневных и ~ 50% для ночных условий в сравнении с метеорологически спокойными днями. В вариациях  $foF2$  изменения менее выражены, однако, в день шторма снижение критической частоты достигает ~15%.



**Рисунок 3.1.** Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 9-10 декабря 2010 года

а

б

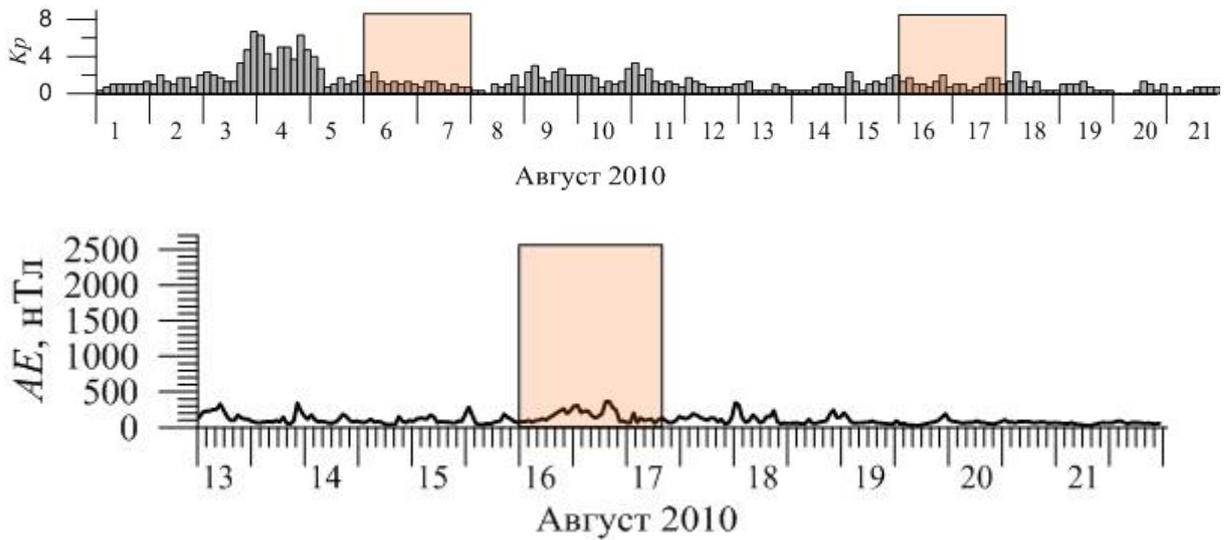


**Рисунок 3.2.** а - суточные вариации давления в период 3-13 декабря 2010 по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ПЭС; г - суточные вариации  $foF2$  6-12 декабря 2010 года

На рисунке 3.4 показаны вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологического возмущения 18 августа 2010 г. Отметим, что летом штормовые метеоусловия в Калининградском регионе отмечаются значительно реже, чем в другое время года. Геомагнитные условия 13-23 августа 2010 были спокойные, значения Кр индекса не превышали 3 (рис. 3.3). Солнечная активность слабо менялась, понижаясь от  $F10.7 = 86$  13 августа 2010 до  $F10.7 = 76$  23 августа 2010.

Понижение атмосферного давления началось 14 августа 2010, достигло минимальных значений 18 августа 2010, непосредственно в день шторма, и начало повышаться 20 августа 2010. Ветровой режим в период наблюдений характеризовался усилением порывов ветра, главным образом в дневное время 18-

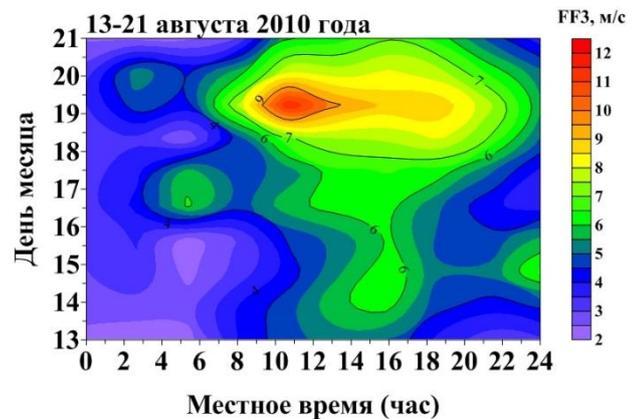
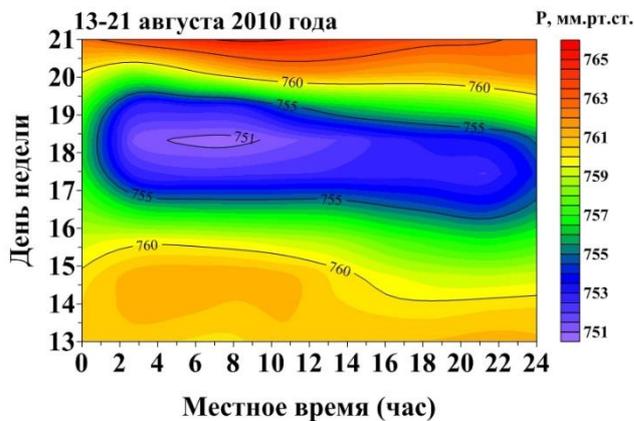
19 августа 2010, и достигал максимальных значений  $\sim 14$  м/с 19 августа 2010. Возмущения ПЭС и  $f_oF2$  отчетливо проявились 14 и 18 августа (белым цветом на рисунке 3.2г отмечены участки наблюдений, в которых не удалось определить значение критической частоты в виду сильного поглощения в E и D областях ионосферы). Понижение дневных значений ПЭС в эти дни достигает  $\sim 30-40\%$  по отношению к предшествовавшим метеорологически спокойным дням, а для критической частоты  $\sim 15-20\%$  [175].



**Рисунок 3.3.** Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 6 и 16 августа 2010 года

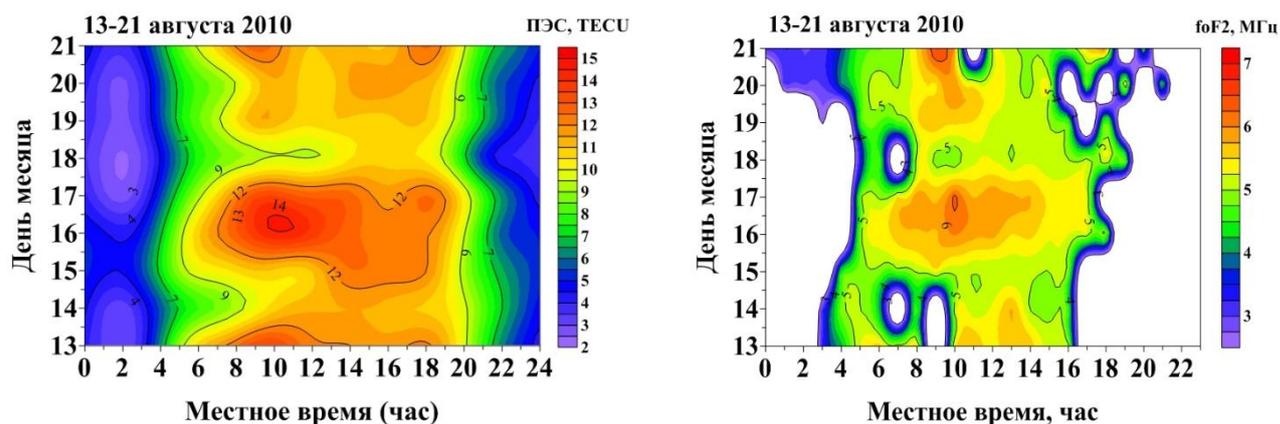
а

б



в

г

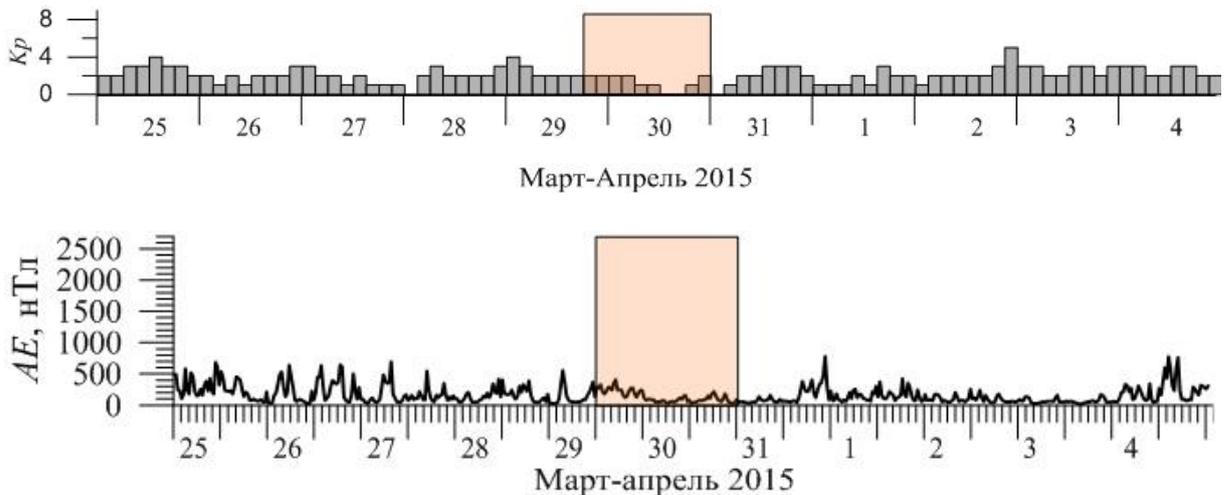


**Рисунок 3.4.** а - суточные вариации приземного атмосферного давления; б - суточные вариации амплитуды скорости ветра; в - суточные вариации ТЭС; г - суточные вариации  $foF2$ . в период 13-21 августа 2010 года по наблюдениям ст. Калининград

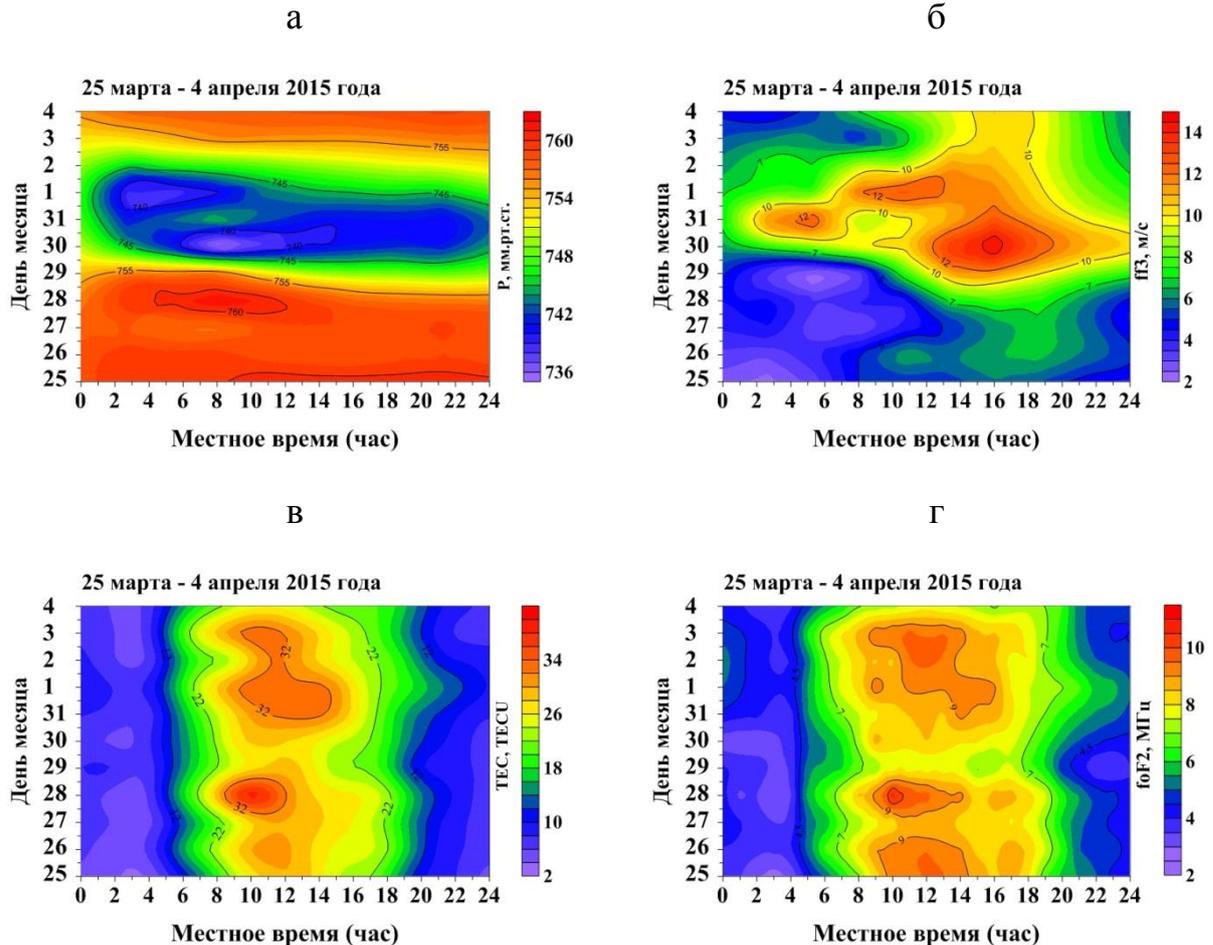
На рисунках 3.5-3.6 представлен аналогичный анализ для метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года. Геомагнитная обстановка в этот период была относительно спокойной, Кр-индекс не превышал значение 3. Непосредственно в дни прохождения шторма 30 марта, значения Кр-индекса не превышали 1. Солнечная активность в этот период также оставалась спокойной,  $F10.7 = 140$ .

Период пониженного атмосферного давления начался 29 марта 2015 и продолжался по 2 апреля включительно. Ветровой режим в приземной атмосфере характеризовался усилением амплитуд порывов ветра на начальной фазе снижения атмосферного давления и, наиболее заметно, 30-31 марта, когда амплитуда скорости ветра достигала 12 м/с. Данный шторм оценивается по шкале Бофорта в 6 баллов. Результаты наблюдений ионосферных параметров в исследуемый период также отмечается понижение значений критической частоты F слоя, достигающие 30% по сравнению с метеорологически спокойными днями. В вариациях ПЭС 29-30 марта также отмечается понижение значений ПЭС, достигающее ~30-40% для дневных условий в сравнении с метеорологически спокойными днями [176].

Как видно из рисунка 3.6 а, б где показаны суточные вариации атмосферных параметров, период пониженного атмосферного давления начался 29 марта 2015 г. и продолжался по 2 апреля включительно. Ветровой режим в приземной атмосфере характеризовался усилением амплитуд порывов ветра на начальной фазе снижения атмосферного давления и, наиболее заметно, 30 – 31 марта, когда амплитуда скорости ветра достигала 12 м/с, что оценивается по шкале Бофорта в 6 баллов. Были проанализированы результаты наблюдений ионосферных параметров в исследуемый период. Как видно, в вариациях  $foF2$  отмечается понижение значений критической частоты F2-слоя 29-30 марта 2015 года, достигающие 30% по сравнению с метеорологически спокойными днями. В вариациях ПЭС в эти дни также отмечается понижение значений, отчетливо проявляющееся в дневных условиях и достигающее  $\sim 30-40\%$  в сравнении с метеорологически спокойными днями.

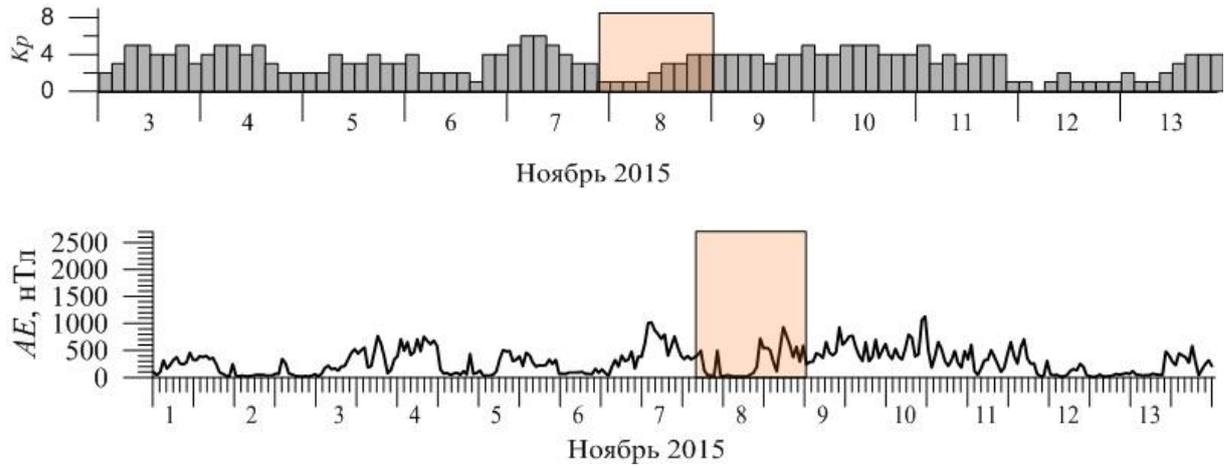


**Рисунок 3.5.** Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года

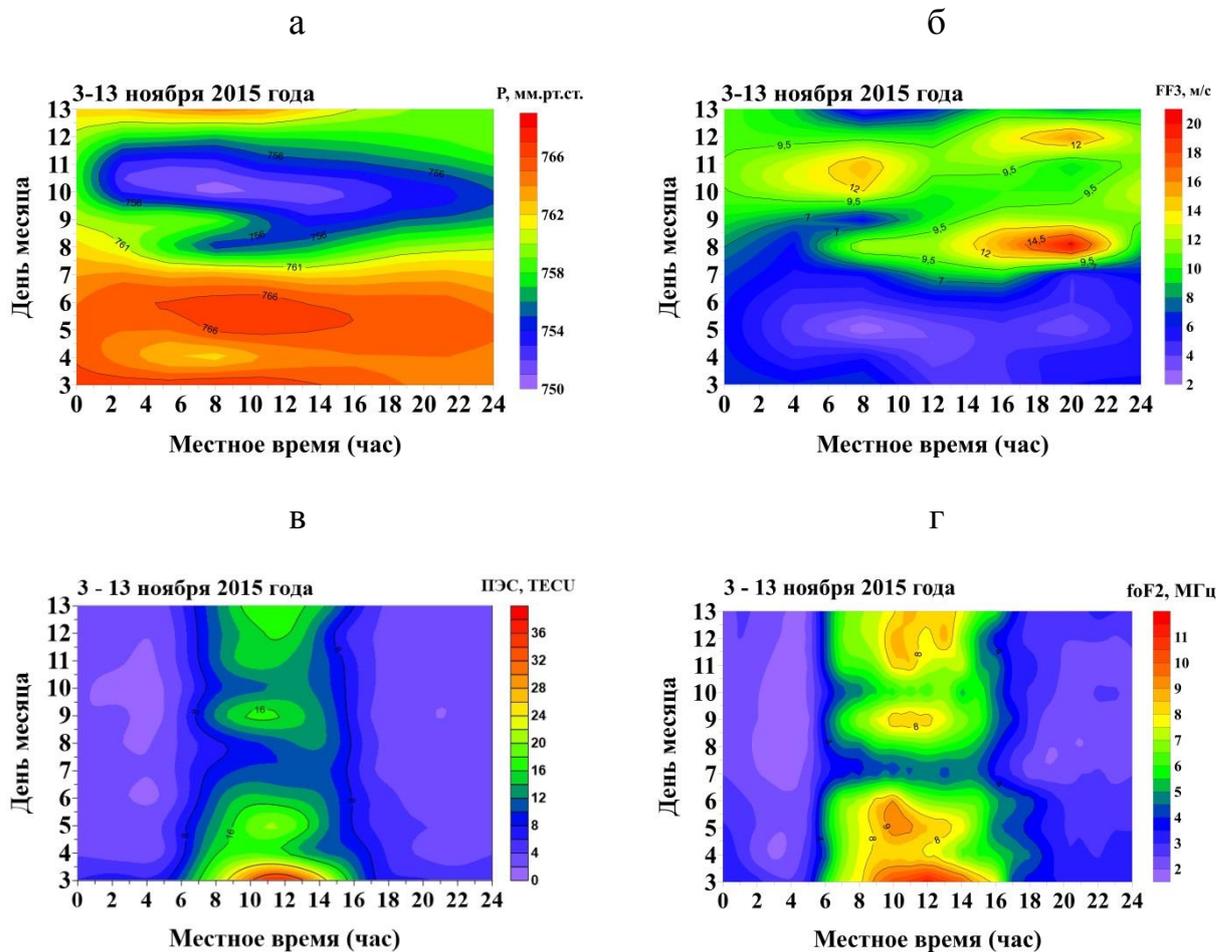


**Рисунок 3.6.** Суточные вариации давления 25 марта – 4 апреля 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации  $foF2$  25 марта – 4 апреля 2015 года (г)

Проанализирован метеорологический шторм 8 ноября 2015 года. На рисунке 3.7-3.8 представлены результаты наблюдений 3 – 13 ноября 2015 г. Штормовые условия (6 баллов по шкале Бофорта) проявились 8 ноября 2015 г. Понижение атмосферного давления 8 ноября 2015 г. сопровождалось повышением амплитуд порывов ветра. В наблюдениях ионосферных параметров также отмечаются периоды понижения критических частот и значений ПЭС согласующиеся по времени возникновения со штормовыми проявлениями метеорологической активности. Солнечная и геомагнитная активность характеризуются солнечным потоком  $F10.7=115-120$  с.е.п. и  $\max(Kp)=4$  [176].

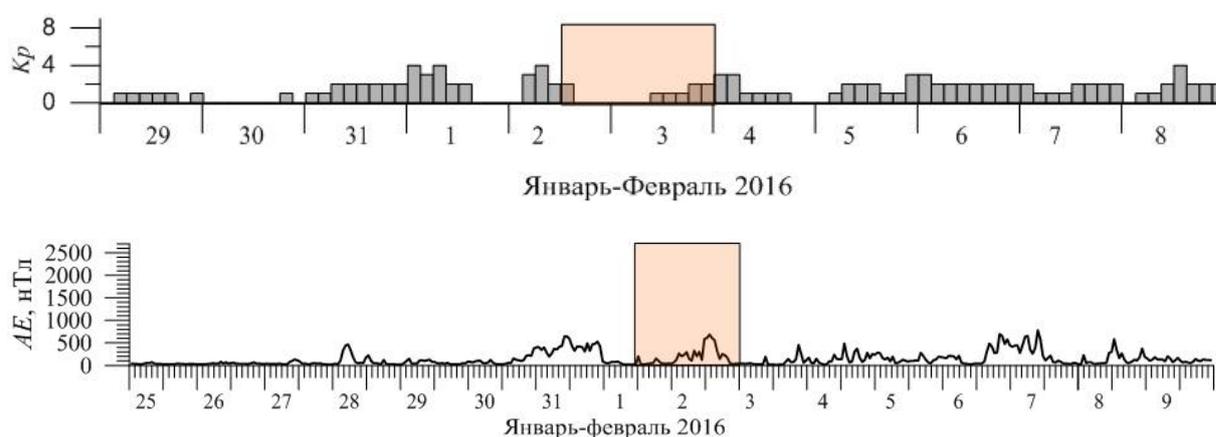


**Рисунок 3.7.** Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 8 ноября 2015 года

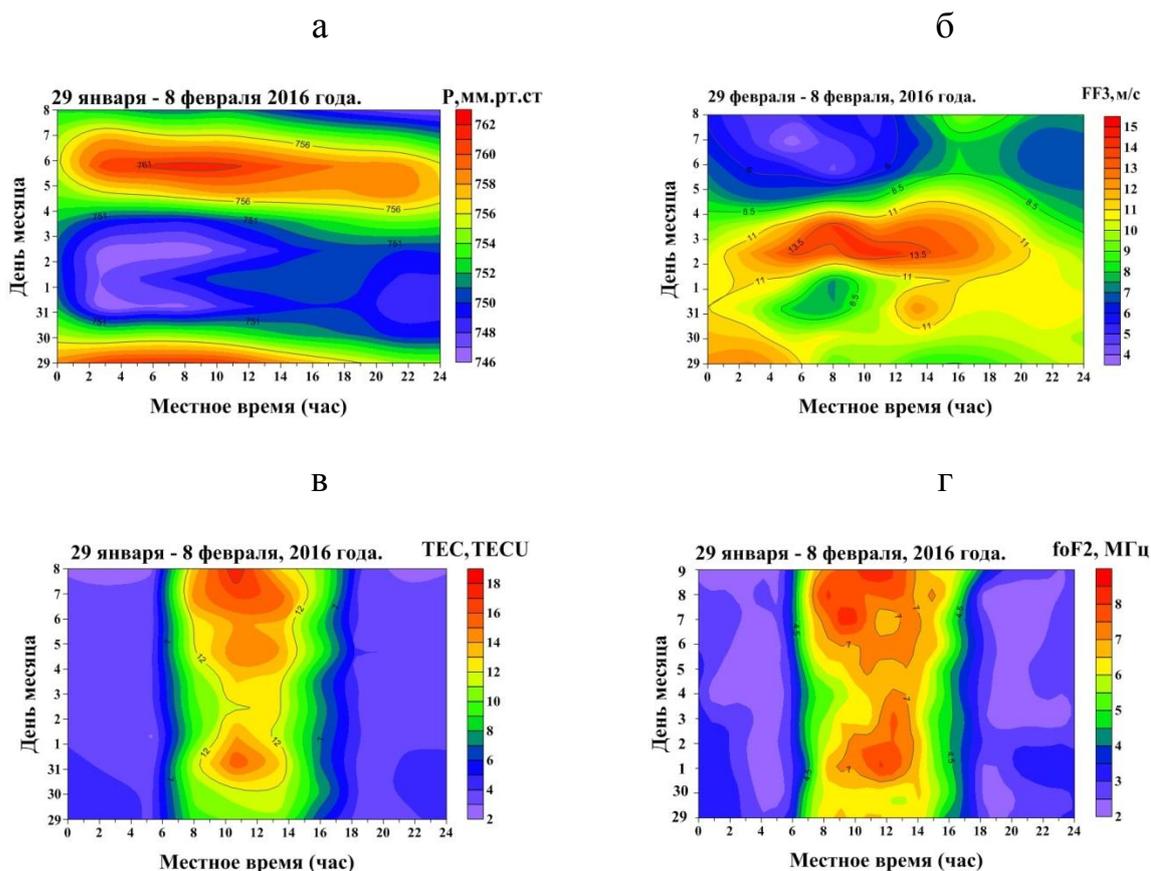


**Рисунок 3.8.** Суточные вариации давления 3 – 13 ноября 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации foF2 3 – 13 ноября 2015 года (г)

На рисунке 3.9-3.10 представлены результаты исследования метеорологического шторма, произошедшего в Калининградской области 2-3 февраля 2016 года. Штормовое возмущение (6 баллов по шкале Бофорта) возникло 3 февраля. Как видно из рисунка, область низкого атмосферного давления наблюдалась с 31 января по 4 февраля 2016. Значительные возмущения ветрового режима проявились, главным образом, в дневное время 02-03 февраля 2016. Непосредственно в день шторма 03 февраля 2016 проявляется отчетливое снижение дневных значений ПЭС, достигающее 30-40% по отношению к предшествовавшим метеорологически спокойным дням. В наблюдениях критической частоты в F - слое ионосферы также отмечается снижение дневных значений на 15-20% по отношению к спокойным дням [177].



**Рисунок 3.9.** Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 2-3 февраля 2016 года.



**Рисунок 3.10.** а - суточные вариации давления в период 29 января – 8 февраля 2016 по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ПЭС; г - суточные вариации  $foF2$ .

За 2008-2015 года были проанализированы 17 штормов. Характерная картина, показанная выше, наблюдается практически во всех рассматриваемых событиях и представлена в таблице 3.1 [175-177].

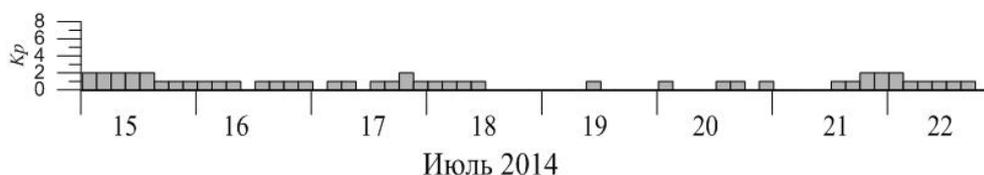
Дата шторма	Отклонение ПЭС, %	Отклонение $foF2$ , %
06-07.10.2008	нет данных	50%
18.11.2009	16%	28%
25.12.2009	18%	10%
26.03.2010	нет данных	22%

06.08.2010	18%	35%
16.08.2010	47%	34%
02.09.2010	нет данных	20%
08.12.2010	18%	33%
02-03.03.2013	30%	40%
06.12.2013	20%	32%
15.03.2013	10%	16%
19.07.2015	нет данных	15%
29-30.03.2015	25%	25%
16.06.2016	25%	25%
02.07.2016	40%	24%
03.02.2016	20%	32%
06.07.2016	35%	36%

**Таблица 3.1.** Исследуемые метеорологические шторма на территории Калининградской области и их влияние на ионосферные параметры.

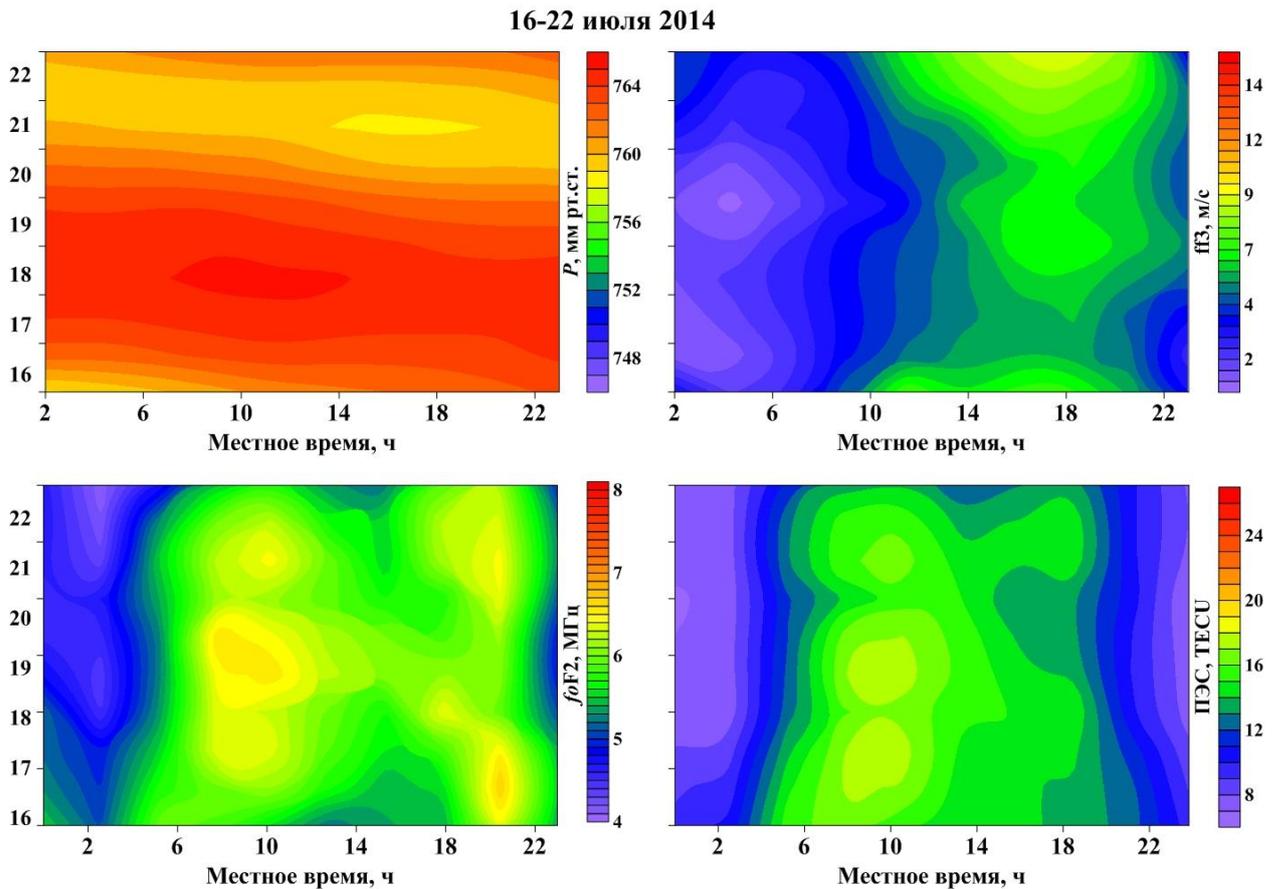
Анализ результатов ионосферных наблюдений в такие периоды показал, что понижения электронной концентрации в ионосфере, аналогичные показанным выше, наблюдаются устойчиво.

Для подтверждения проведенных исследований метеорологических штормов и их влияния на ионосферные параметры был выбран и исследован метеорологически и гелиогеофизически спокойный период 16-22 июля 2014 года. На рисунке 3.11 показаны изменения индексов  $K_p$  и  $A_E$  в исследуемый период. Как видно из рисунков, 15-23 июля 2014 года наблюдался спокойный период, геомагнитные возмущения отсутствуют.





**Рисунок 3.11.** Геомагнитные условия в период 15-23 июля 2014 года.



**Рисунок 3.12.** а - суточные вариации давления в период 16- 22 июля 2014 года по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ПЭС; г - суточные вариации  $foF2$ .

На рисунке 3.12 показаны вариации атмосферных и ионосферных параметров в исследуемый период. Как видно из рисунков, 16-22 июля 2014 года атмосферное давление оставалось высоким и не отмечается областей резкого понижения давления. Величина порывов ветра также находится в пределах нормы

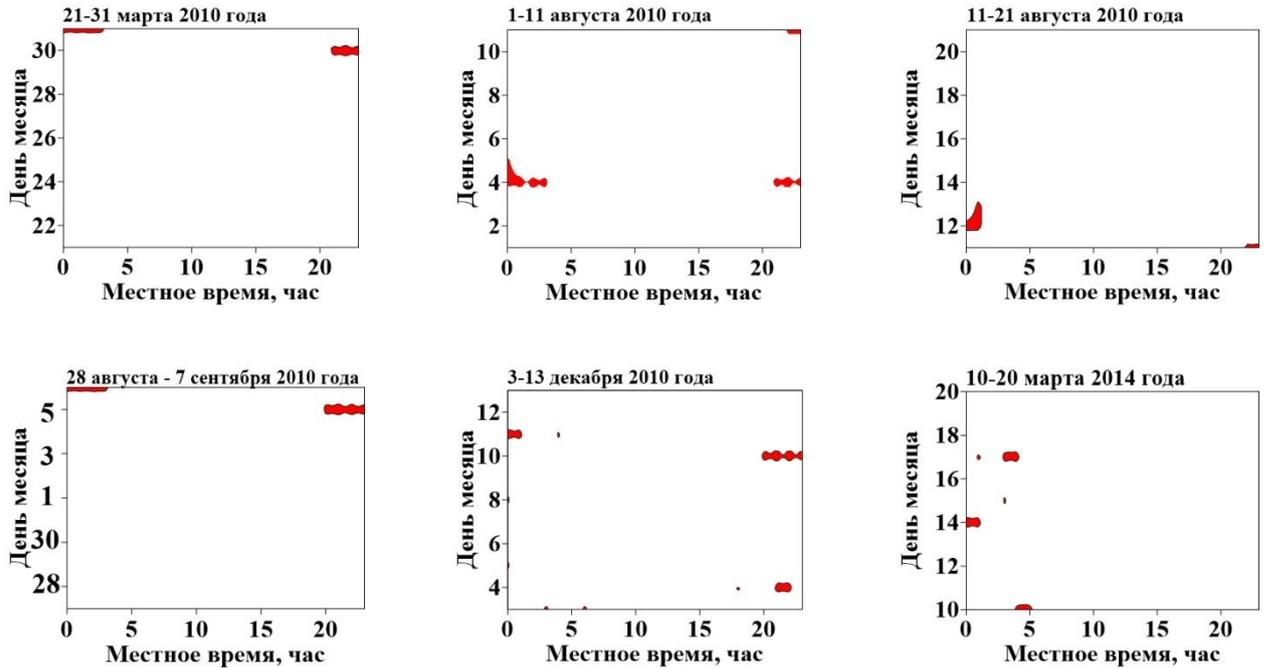
спокойных атмосферных условий. В вариациях ионосферных параметров отмечается суточный ход без резких изменений значений.

Поскольку для анализа ионосферных возмущений отбирались только спокойные по геомагнитным факторам периоды, можно предположить, что причиной такой реакции ионосферы являются возмущения атмосферных параметров в период метеорологического шторма. Однако представленные данные о вариациях атмосферного давления и изменении ветрового режима, по-видимому, не исчерпывают набор метеорологических параметров, характеризующих штормовые условия и определяющих реакцию ионосферы. Также, стоит заметить, что в условиях зимнего шторма реакция ионосферы в большей степени отражала динамику ветрового режима, а в летних условиях — динамику давления.

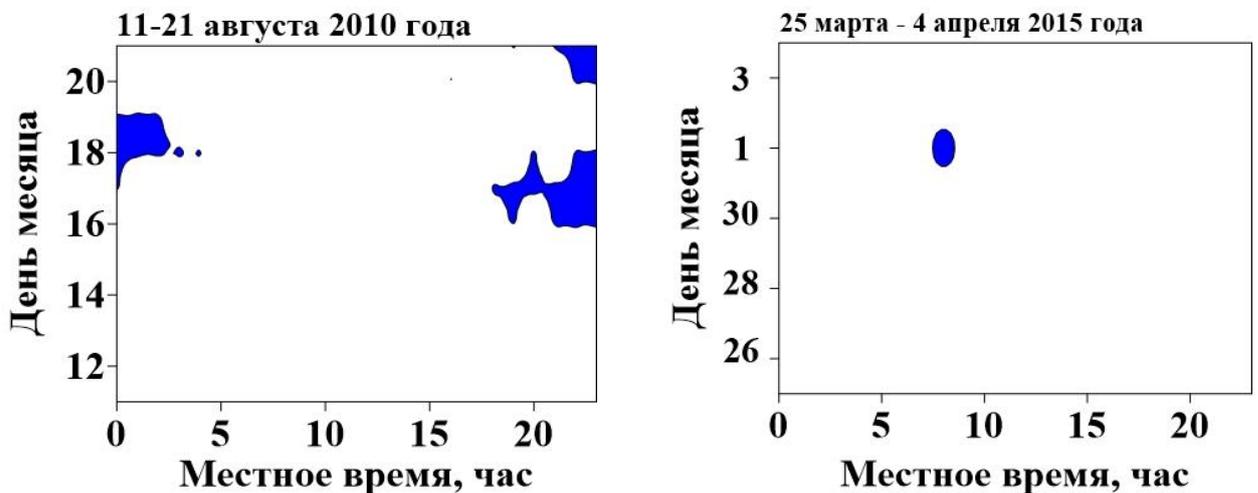
Изучение связей метеорологических и ионосферных процессов является сложной задачей и предполагает продолжение исследований с целью выделения метеорологических факторов, определяющих эти связи.

Данные вертикального зондирования при исследовании некоторых штормов показывают, что в периоды метеорологических возмущений в наблюдениях ионосферы часто отмечается возникновение таких явлений как F-рассеяние и поглощение в D-области, что существенно влияет на определение частотных характеристик вариаций параметров F-области ионосферы [178, 179].

На рисунках ниже представлены метеорологические шторма, в периоды которых в ионосфере по данным вертикального зондирования наблюдались появление таких явлений в период прохождения метеорологических штормов в Калининградской области.



**Рисунок 3.13.** Проявление явления диффузности в период прохождения метеорологических штормов



**Рисунок 3.14.** Проявление явления F-рассеяния в период прохождения метеорологических штормов

Ионосферная реакция на возмущение ветра или давления возникает достаточно быстро, в течение нескольких (~3–6) часов. Наиболее вероятным переносчиком энергии метеорологического возмущения в верхнюю атмосферу

являются АГВ и короткомасштабные ВГВ.

Экспериментальные наблюдения волновых вариаций ионосферы в периоды усиления циклонической активности выявляют в наблюдениях ПЭС вариации с периодами АГВ и ВГВ. Можно предположить, что быстрые изменения метеорологической обстановки в условиях шторма создают благоприятные условия для возбуждения АГВ в широком диапазоне периодов. Распространение АГВ в верхнюю атмосферу и их диссипация вызывают наблюдаемые возмущения ионосферы. Теоретические исследования процессов распространения АГВ от источников в нижней атмосфере показывают, что волны этого диапазона способны быстро достигать верхней атмосферы и вследствие диссипации формировать крупномасштабные возмущения и, в частности, локальные области нагрева. Заметные крупномасштабные возмущения верхней атмосферы, обусловленные диссипацией АГВ, распространяющихся от источников в нижней атмосфере, отмечаются через 1–2 ч после начала работы источника [21, 94]. Появление области локального нагрева в верхней атмосфере должно влиять на ионизационный баланс в ионосфере и приводить к понижению электронной концентрации в ионосфере вследствие изменения влияния рекомбинационных процессов.

### **3.2. Моделирование возмущение верхней атмосферы вследствие распространения АГВ от поверхности Земли**

Для понимания физических процессов формирования ионосферных возмущений от источников АГВ в нижней атмосфере необходимо выполнить ряд исследований с целью определения характеристик волн, способных распространяться от поверхности Земли до верхней атмосферы. При этом в рассмотрение необходимо включить как ВГВ, так и акустическую составляющую АГВ. Теоретические исследования распространения АГВ указывают на

возможность передачи энергии этих волн верхней атмосфере и их участия в реализации связей нижних и верхних атмосферных слоев [121].

Цель численного эксперимента состояла в оценке возможности формирования возмущений верхней атмосферы, локализованных в области над источником волн на поверхности Земли, вследствие распространения АГВ из нижней атмосферы. Для описания динамики АГВ обычно применяются двумерные модели, поскольку для волновых процессов рассматриваемых масштабов влияние силы Кориолиса несущественно, а источники возмущений в нижней атмосфере – сейсмически активные области или метеорологические фронты часто можно рассматривать как двумерные, поскольку их протяженность существенно превосходит поперечный размер [18, 21, 126, 180].

В численном эксперименте применена двумерная модель нестационарных атмосферных процессов, основанная на решении гидродинамических уравнений [181-183]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} &= \frac{-\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \xi(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \xi(z) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} &= \frac{-\partial P}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial}{\partial z} \left( \xi(z) \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \xi(z) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.1) \\ \frac{1}{\gamma-1} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\gamma}{\gamma-1} P \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial z} K(z) \frac{\partial T}{\partial z} + K(z) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{viscos} + \\ &Q(z) \\ Q_{viscos} &= \xi(z) \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\}; \quad Q(z) = \frac{-\partial}{\partial z} K(z) \frac{\partial T_0}{\partial z} \end{aligned}$$

В (3.1)  $x, z$  - горизонтальная и вертикальная координаты,  $t$  - время,  $\rho$  - плотность;  $u, w$  - горизонтальная и вертикальная компоненты скорости;  $T$  - температура;  $P = \frac{\rho RT}{\mu}$  - давление;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $\mu$  - молекулярный вес;  $g$  - ускорение свободного падения,  $\gamma$  - показатель адиабаты;  $\xi(z)$   $K(z)$  - коэффициенты вязкости и теплопроводности;  $T_0(z)$  - вертикальное распределение температуры в начальном условии.

На верхней границе ( $h = 500$  км) заданы условия:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 ;$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 ;$$

$$w = 0;$$

$$z = h.$$

На нижней границе задан источник возмущений, в качестве которого рассматриваются вариации вертикальной компоненты скорости на поверхности Земли в области протяженностью  $\sim 20$  км, так называемый точечный источник.

Зависимость возмущений от времени задается суперпозицией десяти гармонических функций с периодами от  $0.5\omega_g$  до  $1.5\omega_g$ , где  $\omega_g$  - частота Вайсяля-Брента на поверхности Земли.

$$w(x, z = 0, t) = \sum_{i=1}^{10} a_i \sin(\omega_i t) f(x);$$

$$f(x) = \exp \left\{ - \left( \frac{x - x_0}{\sigma} \right)^2 \right\}$$

$$\omega_i = \frac{\omega_g}{2} + \frac{(i-1)\omega_g}{10}, i = 1, 2, \dots, 10 ;$$

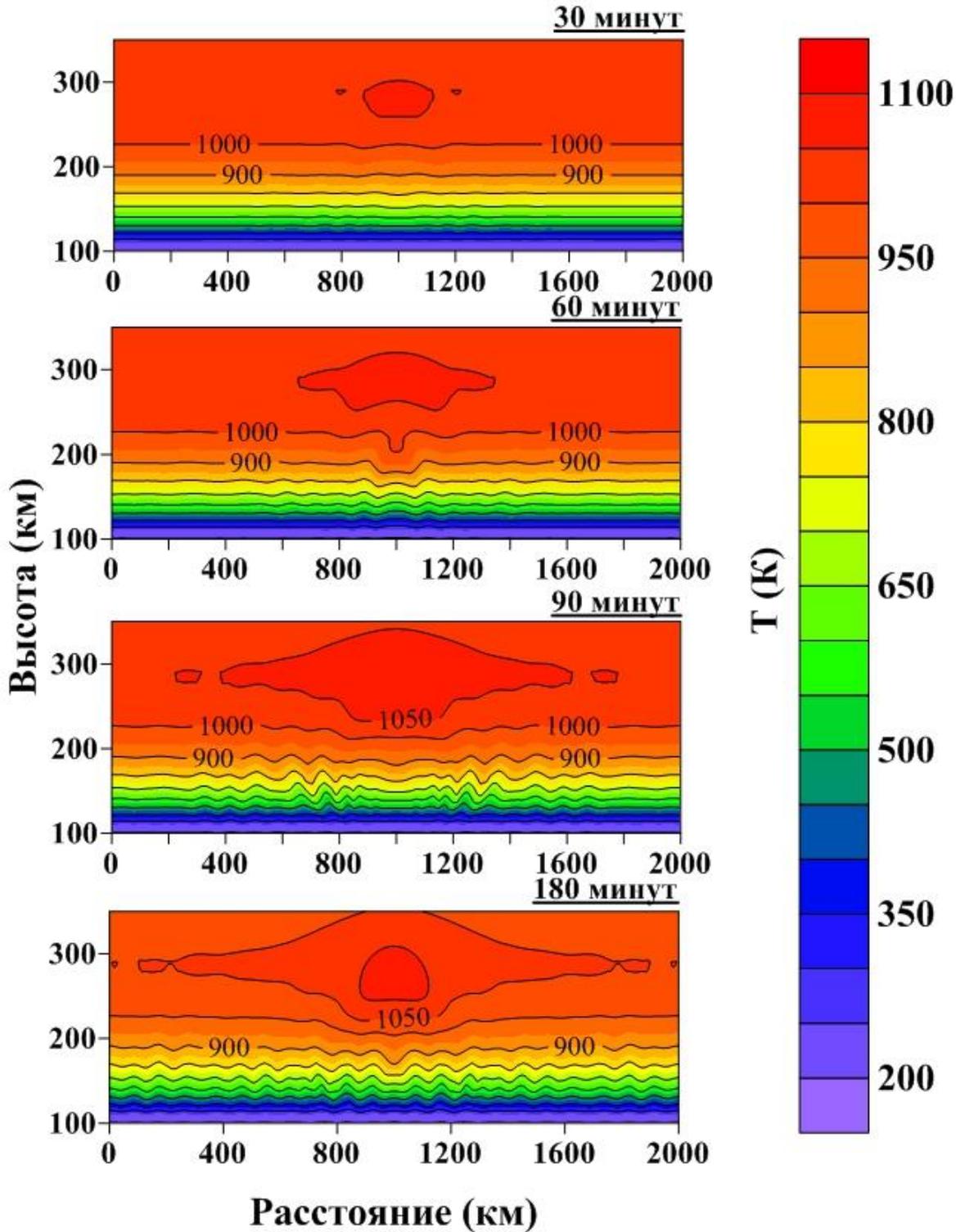
$$x_0 = 0; \sigma = 20 \text{ км}; a_i = 0.01 \text{ м/с} \quad (3.2)$$

Периоды гармоник в рассматриваемом численном эксперименте лежат в интервале от 3 до 10 мин. Амплитуда возмущения температуры, создаваемая источником (3.2), составляет  $\sim 3\%$  невозмущенной температуры. Выбор частотных характеристик возмущений определяется тем, что волны этого диапазона могут распространяться в атмосфере и достигать высот верхней атмосферы.

Модель учитывает нелинейные и диссипативные процессы, сопровождающие распространение волн, включая возможное образование ударных волн, разрушение волн и образование турбулентности, а также обеспечивает самосогласованное рассмотрение процессов распространения волн и изменения состояния среды вследствие передачи энергии волн среде. В последнем уравнении системы (3.1)  $Q(z)$  учитывает дополнительный приток тепла, обеспечивающий стационарность неизотермической атмосферы в отсутствие возмущений [181-183].

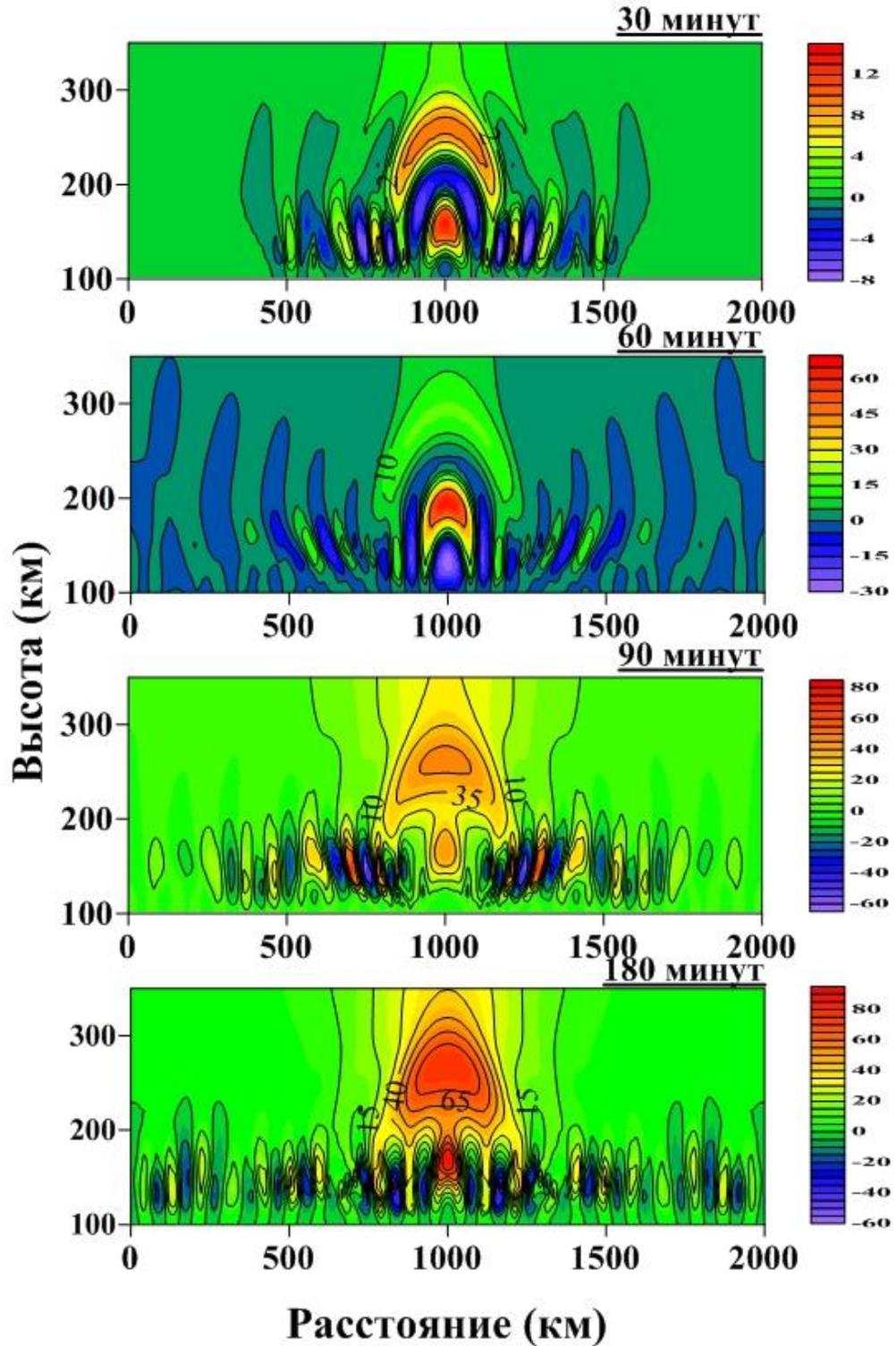
На рисунках 3.15, 3.16 показаны пространственные распределения волновых возмущений температуры атмосферы -  $(T(x,z,t) - T_0(z))$  и температура атмосферы  $T(x,z,t)$  для нескольких моментов времени после начала постоянной работы наземного источника. Как видно из рисунков, волновые возмущения отмечаются на всех высотах атмосферы уже через полчаса непосредственно над источником и достигают высот  $\sim 300$  км на расстояниях  $\sim 500$  км в горизонтальном удалении от него. Через 1.5-2 часа после включения источника можно отметить существенное изменение режима распространения волн, проявляющееся в волноводном характере распространения атмосферных волн в области ниже  $\sim 200$  км, и отсутствии волновых возмущений выше 250-300 км. На начальном этапе развития возмущения в верхней атмосфере пространственный масштаб волн имеет тенденцию к увеличению по мере удаления от источника возмущений. Так, через 30 минут после начала работы источника, пространственный масштаб волн не превышает  $\sim 100$  км на горизонтальном

удалении  $\sim 200$  км и достигает  $\sim 150-200$  км на больших расстояниях от источника. Через 1-2 час область малых пространственных масштабов ( $\sim 100$  км) возмущений расширяется в горизонтальном направлении до  $\sim 1000$  км от источника. Максимальные амплитуды волновых возмущений наблюдаются непосредственно над источником на высотах  $\sim 200-250$  км. На больших высотах над источником (выше 250км) амплитуда возмущений медленно возрастает с течением времени после включения источника, оставаясь существенно меньшей амплитуды возмущений в области высот  $\sim 100 - 200$  км. В горизонтальном направлении, по мере удаления от источника, амплитуда волновых возмущений в области высот  $\sim 100-200$  км медленно убывает. Изменение характера распространения волн, очевидно, связано с изменением состояния атмосферы вследствие нагрева среды диссипирующими волнами. Как видно из рисунка 3.15, увеличение температуры  $T(x,z,t)$  среды наблюдается на высотах  $\sim 250 - 300$  км и на горизонтальных расстояниях от источника  $\sim 100$  км через полчаса после включения источника. Нагретая область атмосферы расширяется с течением времени в горизонтальном и вертикальном направлениях. Через  $\sim 2$  часа эта область снижается до высот  $\sim 200$  км и расширяется по горизонтали до  $\sim 1000$  км от источника. Расширение в горизонтальном направлении нагретой волнами области верхней атмосферы сопровождается увеличением протяженности области волноводного распространения на высотах меньших  $\sim 200$  км.



**Рисунок 3.15.** Средняя температура в верхней атмосфере через 30 мин, через 60 мин, 90 мин и 180 мин. после включения наземного источника АГВ.

Горизонтальная координата источника  $x=1000$  км.



**Рисунок 3.16.** Волновые возмущения температуры в верхней атмосфере через 30 мин, через 60 мин, 90 мин и 180 мин. после включения наземного источника АГВ. Горизонтальная координата источника  $x=1000$  км.

На рисунке 3.16 показаны результаты расчетов добавки ( $T(x,z,t)-T_0(z)$ ) и температуры  $T(x,z,t)$  при нестационарном воздействии наземного источника через полчаса, час, полтора и три часа после включения источника. Продолжительность работы источника в этом варианте расчетов составляет  $\sim 1$  час. Пространственная структура волновых возмущений и температуры на временах  $\sim 1$  час в обоих вариантах работы источника практически одинакова. Через 1.5 часа, после включения источника на высотах ниже  $\sim 200$  км сохраняется волноводный характер распространения волновых возмущений, так же, как и в варианте с постоянно работающим источником. Однако с течением времени и быстрым снижением амплитуды источника, уменьшается протяженность области волноводного распространения и появляется область вертикального распространения волн. Амплитуда волновых возмущений уменьшается с течением времени и по мере удаления от источника возмущений. С течением времени, после включения источника и снижением его амплитуды, нагретая область атмосферы сужается по вертикали и сокращается в горизонтальном масштабе, оставаясь отчетливо выделяемой и через 3 часа после включения источника. Изменение пространственной структуры нагретой области атмосферы влияет на волноводный характер возмущений и приводит к его прекращению за ее пределами [21, 94, 158].

Таким образом, результаты расчетов показали, что АГВ, возбуждаемые локализованными источниками на поверхности Земли, распространяются до высот верхней атмосферы и ионосферы. При этом отмечаются два взаимосвязанных эффекта: формирование и расширение области повышенной температуры верхней атмосферы, вследствие диссипации АГВ и работы источника, и волноводное распространение волновых возмущений ниже 200 км и на пространственных масштабах сопоставимых с размерами нагретой области. Теоретические исследования процессов распространения АГВ от источников в нижней атмосфере показывают, что волны этого диапазона способны быстро достигать верхней атмосферы и вследствие диссипации формировать

крупномасштабные возмущения и, в частности, локальные области нагрева. Заметные крупномасштабные возмущения верхней атмосферы, обусловленные диссипацией АГВ, распространяющихся от источников в нижней атмосфере, отмечаются через 1-2 час после начала работы источника [158].

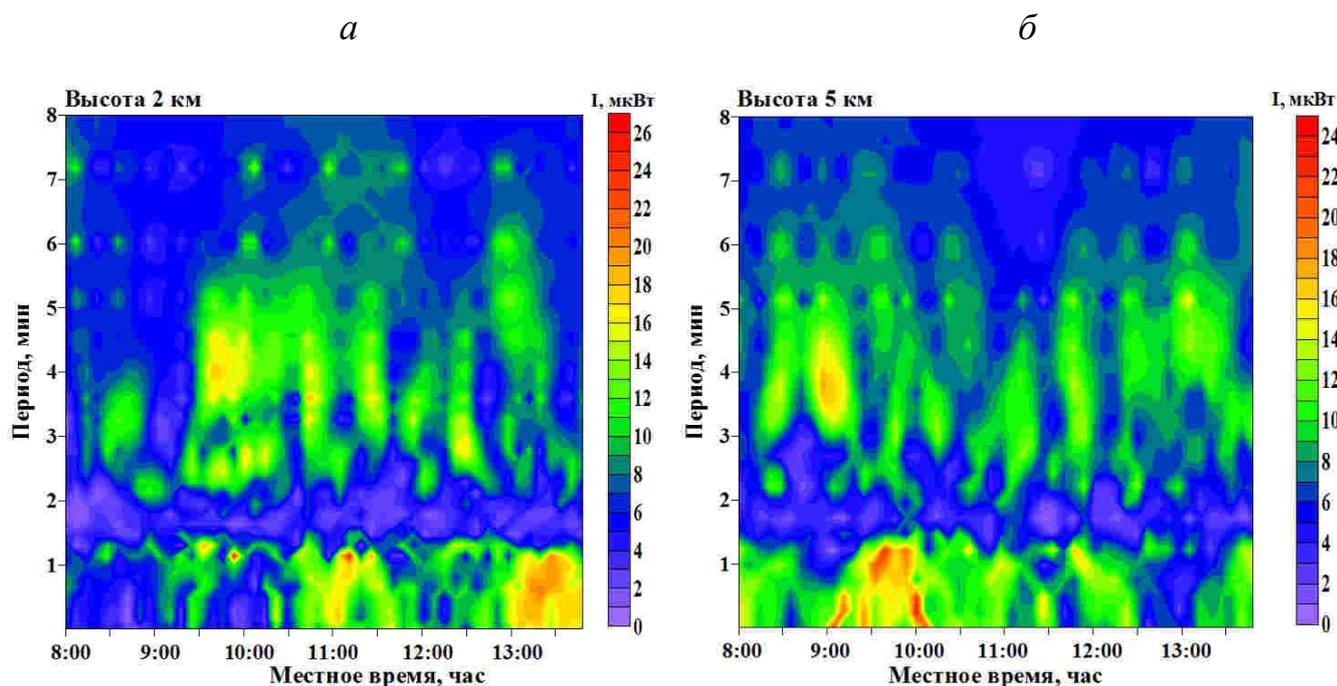
Возникновение нагретой области изменяет условия распространения АГВ и приводит к волноводному распространению волн с периодами меньшими периода Вейселя-Брента. Верхней границей волновода является образовавшаяся нагретая область верхней атмосферы. Результаты расчетов показали, что, нагрев в верхней атмосфере и ионосфере вследствие распространения и диссипации АГВ приводит к изменению рекомбинационных процессов и уменьшению  $n[\text{O}]/n[\text{N}_2]$ .

### **3.3. Исследование вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы при локальных метеорологических явлениях в Калининградской области**

Данные для исследования частотных характеристик вариаций параметров ионосферы были выбраны в периоды метеорологических штормов, которые имели место в Калининграде. Для определения частотных характеристик вариаций параметров ионосферы была использована методика, описанная в главе 2.

На рисунке 3.17 показаны изменения спектров вариаций рассеянного лидарного сигнала в течение наблюдений 3 февраля 2016 года. Как видно из рисунка 3.17, в спектре вариаций параметров нижней атмосферы наблюдается усиление вариаций с периодами менее 3 минут и вариации с периодами более 5 минут. Высокочастотный диапазон вариаций, очевидно, соответствует колебаниям параметров атмосферы с периодами АГВ. Низкочастотные колебания (более 5 минут) соответствует гравитационной ветви колебаний (ВГВ). В то же время в вариациях параметров с периодами 3-5 минут отмечается отчетливое

понижение амплитуд вариаций, которые, по-видимому, определяется частотой акустического обрезания и частотой Вайсяля-Брента на данных высотах.



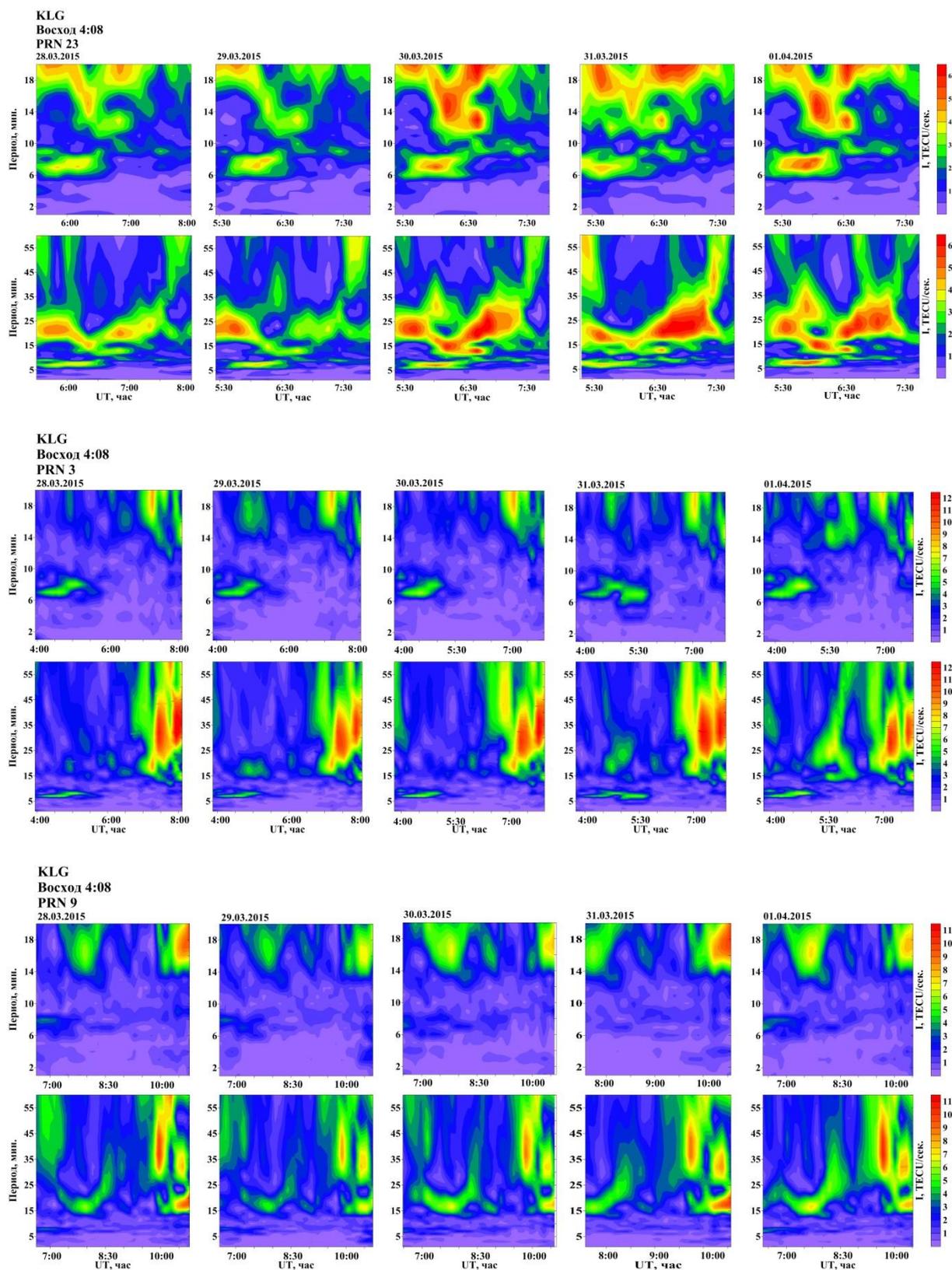
**Рисунок 3.17.** Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 2, 5 км 3 февраля 2016 года. Канал 1064 нм.

Результаты анализа ионосферных наблюдений показали, что в периоды метеорологических возмущений на фоне низкого атмосферного давления проявляется снижение амплитуды суточных вариаций ПЭС, достигающего 50% по отношению к метеоспокойным дням. Анализ вариаций параметров атмосферы и ионосферы показал, что в условиях метеорологических штормов усиление вариаций параметров с периодами АГВ отмечается как в нижней атмосфере, так и в ионосфере.

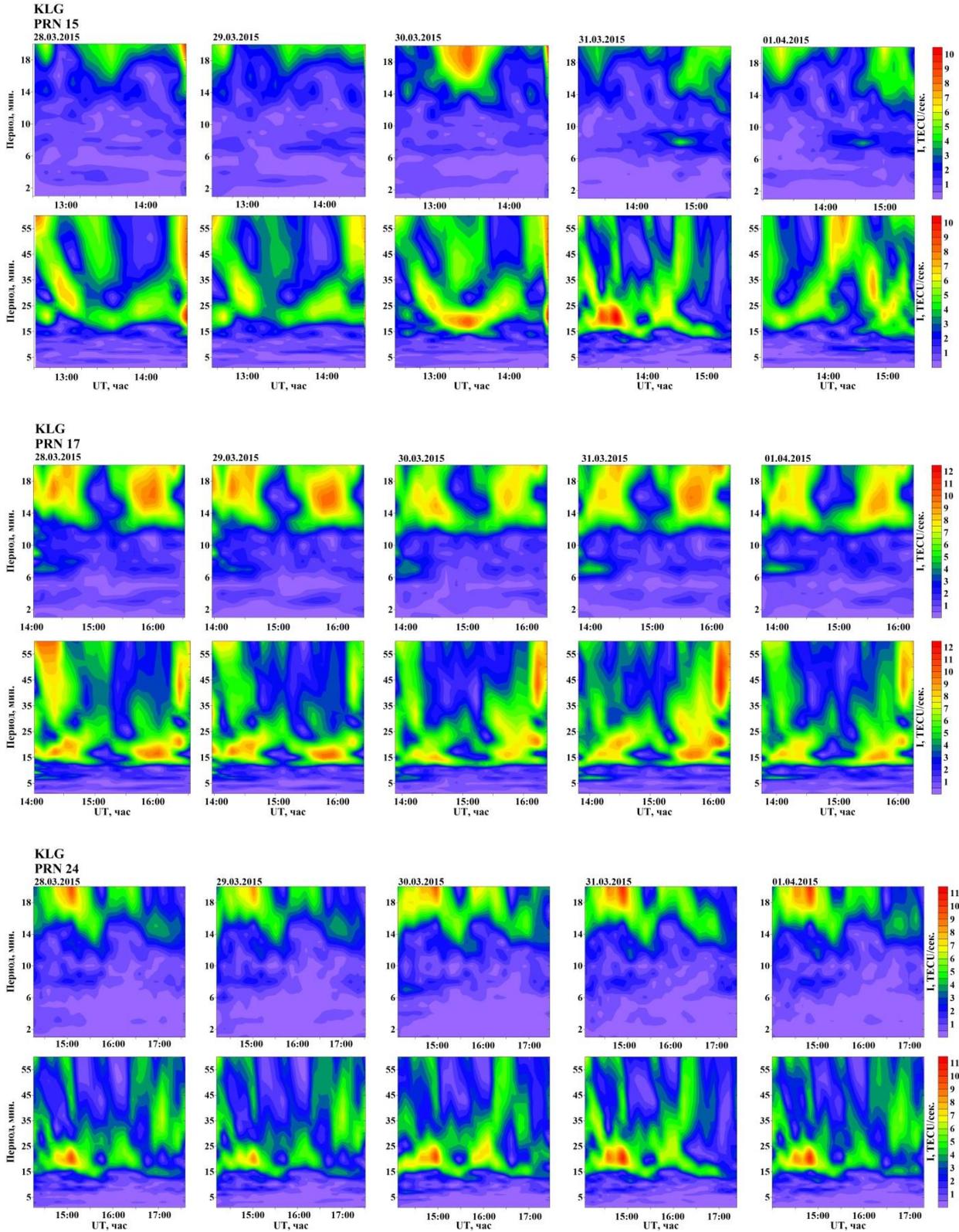
Для исследований спектральных характеристик вариаций ионосферы применялась программа обработки ионосферных данных ПЭС "DSTEC" описанная в п. 2.3. Результаты анализа на примере рассмотрения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 показаны на рисунках 3.18-3.20. На

рисунках показаны спектры вариаций ПЭС полученные по наблюдениям отдельных спутников GPS наблюдавшихся 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 тоже время.

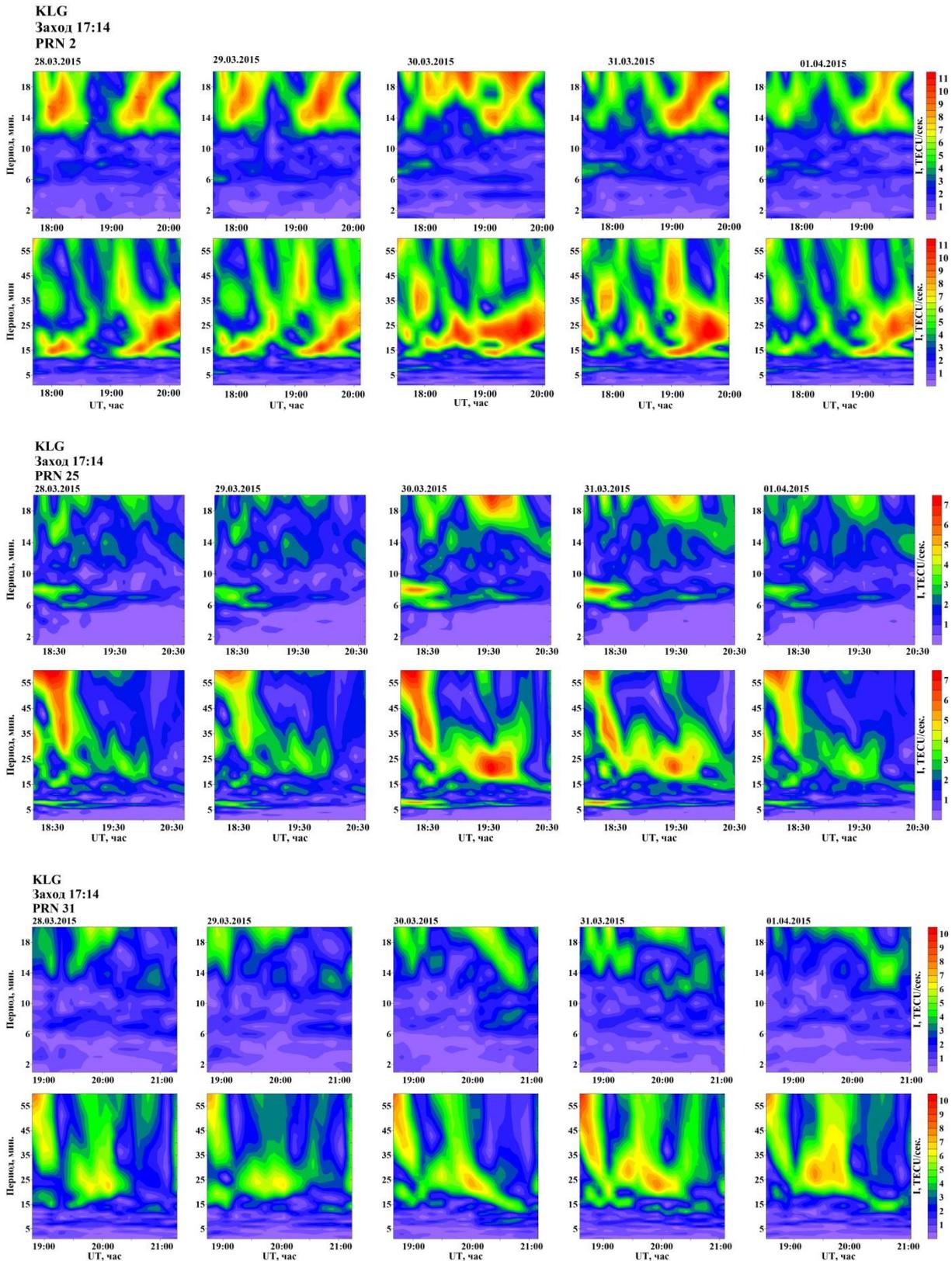
Для лучшего анализа вариации параметров ПЭС строились в двух частотных диапазонах. В диапазоне с периодами до 20 минут определялся вклад составляющих АГВ, а в диапазоне до 60 минут вклад АГВ и короткомасштабных ВГВ.



**Рисунок 3.18.** Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS с 6:00 до 10:00 местного времени на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года



**Рисунок 3.19.** Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS с 13:00 до 17:00 местного времени на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года



**Рисунок 3.20.** 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 года

В выбранную дату восход солнца пришелся на 4:08 UT. В утренний период наблюдаются эффекты, связанные с прохождением СТ, а именно усиление гармоник с периодами 6-8 минут. В штормовой день отмечено усиление гармоник с периодами 20-25 минут, которое сохраняется на протяжении двух дней после бури, постепенно затухая. При этом отмечается снижение амплитуд гармоник с периодами больше 35-40 минут, а также усиление составляющих вариаций с периодами АГВ в буревой день с медленным затуханием по окончании метеорологического шторма. Наиболее чувствительными к динамике метеорологического возмущения оказываются вариации с периодами 12-15 минут, что соответствует периодам Вяйсяля-Брента на высоте 150-200 км. Также замечено, что с ростом периода вариаций, их максимумы смещаются во времени. В соответствии с этим возмущения вариаций с периодами порядка 40-60 минут отмечается на следующий день после прохождения метеорологического возмущения.

В дневных наблюдениях отмечается существенное возрастание амплитуд вариаций с периодами АГВ, которое продолжается в течение 1-2 суток после дня шторма. Также отметим, что наибольшее изменение структуры вариаций ПЭС приходится непосредственно на день метеорологического возмущения и на следующий день, и эти изменения проявляются в возмущении вариаций с периодами Вяйсяля-Брента в области высот 150-200 км.

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.

В целом, можно отметить, что ширина спектра возмущений в диапазоне АГВ, 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.

Таким образом, анализ наблюдений вариаций ПЭС показал, что в периоды метеорологических возмущений происходят существенные изменения спектров вариаций, которые проявляются в следующем:

1. Усиление составляющих с периодами АГВ, которые наиболее ярко проявляются в возрастании амплитуд с периодами 6-8 минут в день метеорологического шторма и сохраняются в последующие сутки.

2. В день метеорологического шторма спектр возмущений ПЭС отмечается усиление гармоник вариаций с периодами от 20-25 минут, продолжающиеся в течение суток после прохождения шторма.

3. Анализ наблюдений вариаций ПЭС показывает, что в анализируемом диапазоне вариаций (периоды от 6 до 60 минут) характерное время релаксации возмущения составляет ~1 сутки.

### **3.4. Выводы по главе**

Анализ результатов наблюдений ионосферных параметров, проведенных в Калининграде, показал, что в периоды метеорологических штормов отмечаются существенные понижения ПЭС и критической частоты F-слоя особенно заметные в дневное время. Понижение ПЭС по отношению

к метеорологически спокойным дням достигают  $\sim 50\%$ , а для  $f_oF2 \sim 15\%$ . Такие ионосферные возмущения отмечаются устойчиво в периоды метеорологических штормов, что позволяет рассматривать выявленные ионосферные возмущения как характерные признаки возмущений инициируемых метеорологическими процессами.

Ионосферные возмущения развиваются достаточно быстро в течение нескольких часов после возмущений метеорологической обстановки. Можно предположить, что физические механизмы, реализующие эту связь, связаны с распространением АГВ.

## 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 вариации 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 сокращений и условных обозначений

АГВ	Акустико-гравитационные волны
ВГВ	Внутренние гравитационные волны
ГЛОНАСС	Глобальная Навигационная Спутниковая Система
ГНСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ПИВ	Перемещающиеся ионосферные возмущения
ПЭС	Полное электронное содержание
СТ	Солнечный терминатор
Dst	Индекс возмущенности геомагнитного поля, среднее по долготе уменьшение горизонтальной составляющей геомагнитного поля на низких широтах
GPS	Global positioning system (Глобальная система позиционирования)
$\omega_g$	частота Вейсяля-Брента
UT	Universal Time (универсальное (мировое) время)
TECU	Total Electron Content Units – общепринятая единица измерения ПЭС, равная $10^{16} \text{ м}^{-2}$
$P_0$	суточные вариации атмосферного давления на уровне станции
MSIS	Эмпирическая глобальная модель атмосферы Земли
LT	Local Time (местное время)
Kp	Индекс возмущенности геомагнитного поля, определенный по наибольшей из амплитуд H-, D-, или Z-компоненты для 3-часовых интервалов
$f_oF2$	Критическая частота слоя F2 ионосферы
FF3	максимальных значений скорости ветра на высоте 10 м за период 3 часа между наблюдениями
F10.7	Поток радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см

### Список рисунков

1.1.	Вертикальный профиль (а) скорости звука, (б) частот Вайсяля-Брента (толстая линия) и акустического обрезания (тонкая линия), рассчитанные по модели MSIS .....	28
2.1.	Принципиальная схема лидара.....	41
2.2.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.....	46
2.3.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 3 октября 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.....	46
2.4.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 6 декабря 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.....	46
2.5.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 6 декабря 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.....	47
2.6.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 19 марта 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм.....	47
2.7.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 19 марта 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.....	47
2.8.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала 28 августа 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 1064 нм. ....	48
2.9.	Спектры вариаций интенсивности рассеянного лидарного	

сигнала 28 августа 2012 года на высотах 1 км, 5 км, 10 км (слева направо). Канал 532 нм.....	48
2.10. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 3 октября 2012 года.....	51
2.11. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 6 декабря 2012 года.....	51
2.12. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 19 марта 2012 года.....	52
2.13. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 28 августа 2012 года.....	52
2.14. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 18 ноября 2013 года.....	53
2.15. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 5, 10 км 2 сентября 2014 года.....	53
2.16. Суточные вариации ПЭС слева 12.02.2012, справа 19.03.2012. Серая линия - наблюдения ПЭС с разрешением 30 сек., Черная линия - сглаженные наблюдения с окном сглаживания 1ч.....	57
2.17. Спектры вариаций ПЭС слева для 12.02.2012, справа для 19.03.2012.....	57
2.18. Изменение спектра вариаций ПЭС с периодами 2-20 мин в течение суток.....	58

2.19.	Изменение частоты Вяйсяля-Брента по данным модели MSIS.....	59
2.20.	Спектр вариаций полного электронного содержания 1 марта 2010 г.....	60
2.21.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего СТ.....	64
2.22.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Ольштын 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	64
2.23.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	65
2.24.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Вильнюс 1 марта 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	65
2.25.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 8 февраля 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	66
2.26.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 8 февраля 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	66
2.27.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Калининград 10 октября 2011 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	67
2.28.	Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Ольштын 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ.....	67

- 2.29. Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Рига 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ..... 68
- 2.30. Спектр вариаций ПЭС в верхней атмосфере над станцией Вильнюс 10 октября 2010 года во время прохождения утреннего и вечернего СТ..... 68
- 2.31. Спектр вариаций рассеянного лидарного сигнала в период солнечного затмения 20 марта 2015 года на высоте 5, 10 км..... 71
- 2.32. Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS на ст. Калининград в период солнечного затмения 20 марта 2015..... 72
- 3.1. Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 9-10 декабря 2010 года..... 79
- 3.2. Вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологического возмущения: а - суточные вариации давления в период 3-13 декабря 2010 по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ПЭС; г- суточные вариации  $f_oF2$  6-12 декабря 2010 года. .... 80
- 3.3. Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 6 и 16 августа 2010 года..... 81
- 3.4. Вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологического возмущения: а - суточные вариации приземного атмосферного давления; б - суточные вариации амплитуды скорости ветра; в - суточные вариации ТЕС; г- суточные вариации  $f_oF2$ . в период 13-21 августа 2010 года по наблюдениям ст. Калининград. .... 81

- 3.5. Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года..... 83
- 3.6. Суточные вариации давления 25 марта – 4 апреля 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации  $f_oF2$  25 марта – 4 апреля 2015 года (г)..... 84
- 3.7. Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 8 ноября 2015 года..... 85
- 3.8. Суточные вариации давления 3 – 13 ноября 2015 г. по наблюдениям на ст. Калининград (а); суточные вариации скорости порывов ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации  $f_oF2$  3 – 13 ноября 2015 года (г)..... 85
- 3.9. Геомагнитные условия в период метеорологического шторма 2-3 февраля 2016 года..... 86
- 3.10. Вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологического возмущения: а - суточные вариации давления в период 29 января – 8 февраля 2016 по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ТЕС; г - суточные вариации  $f_oF2$ ..... 87
- 3.11. Геомагнитные условия в период 15-23 июля 2014 года..... 89
- 3.12. Вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологически спокойного периода а - суточные вариации давления в период 16- 22 июля 2014 года по наблюдениям ст. Калининград; б - суточные вариации скорости ветра; в - суточные вариации ПЭС; г - суточные вариации  $f_oF2$ ..... 89
- 3.13. Проявление явления диффузности в период прохождения метеорологических штормов..... 91

- 3.14. Проявление явления F-рассеяния в период прохождения метеорологических штормов..... 91
- 3.15. Средняя температура в верхней атмосфере через 30 мин, через 60 мин, 90 мин и 180 мин. после включения наземного источника АГВ. Горизонтальная координата источника  $x = 1000$  км..... 97
- 3.16. Волновые возмущения температуры в верхней атмосфере через 30 мин, через 60 мин, 90 мин и 180 мин. после включения наземного источника АГВ. Горизонтальная координата источника  $x=1000$  км..... 98
- 3.17. Временная изменчивость спектра вариаций интенсивности лидарного сигнала в наблюдениях в Калининграде на высотах 2, 5 км 3 февраля 2016 года. Канал 1064 нм..... 101
- 3.18. Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS с 6:00 до 10:00 местного времени на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года..... 103
- 3.19. Спектр вариаций полного электронного содержания по наблюдениям отдельных спутников GPS с 13:00 до 17:00 местного времени на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29-30 марта 2015 года..... 104
- 3.20. 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 года..... 105

**Список таблиц**

<b>2.1.</b>	Технические характеристики лидара LSA-2с.....	42
<b>2.2.</b>	Время проведения наблюдений вариаций интенсивности рассеянного лидарного сигнала.....	45
<b>3.1.</b>	Исследуемые метеорологические шторма на территории Калининградской области и их влияние на ионосферные параметры .....	87 - 88

**Список литературы**

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 аэрономия*. — 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 аэрономия*. — 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. 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.
7. Григорьев, Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) / Г.И. Григорьев // *Изв. вузов. Радиофизика*. — 1999. — Т. 42, № 1. — С. 3—24.

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Голицын, Г.С. Динамика природных явлений: климат, планетные атмосферы, конвекция / Г.С. Голицын. — Москва: Физматлит, 2004. — 344 с.
12. 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.
13. Данилов, А. Д. Метеорологические эффекты в ионосфере / А.Д. Данилов, Э.С. Казимировский, Г.В. Вергасова, Г.Я. Хачикян. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. — 271 с.
14. Hines, C. O. Internal atmospheric waves at ionospheric heights. / C. O. Hines // *Can. J. Phys.* — 1960. — V. 38. — P.1440—1479.
15. Francis, S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review / S. H. Francis // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1975. — V. 37. — P. 1011—1054.
16. 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.

17. Гершман, Б.Н. Перемещающиеся ионосферные возмущения (Обзор) / Б.Н. Гершман, Г.И. Григорьев // Известия Вузов. Радиофизика. — 1968. — Т. 11, № 1. — С.5-27.
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. Drobzheva, Ya.V. The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground / Ya.V. Drobzheva, V.M. Krasnov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2003. — V. 65, No. 3. — P. 369 — 377.
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.
22. Krasnov, V. Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from sinusoidal sources and a role of nonlinear processes / V. Krasnov, Ya. Drobzheva, J. Laštovichka // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2007. — V. 69, No. 12. — P. 1357-1365.
23. 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.
24. Yiğit, E. Parameterization of the effects of vertically propagating gravity waves for thermosphere general circulation models: Sensitivity study / E. Yiğit, A. D. Aylward, A. S. Medvedev // Journal of Geophysical research. — 2008. — V. 113. — P. D19106.

25. Martyn, D. F. Troposphere-ionosphere relationship / Martyn, D. F. // *Geophys. Res. Papers, USA*. — 1952. — V. 12 — P. 31–33.
26. Хайнс, И.К.О. Атмосферные гравитационные волны. Термосферная циркуляция / И.К.О. Хайнс. — Москва: Мир, 1975. — С. 85–99.
27. Kato, S. Possible hydromagnetic coupling between the perturbations of the neutral and ionized atmosphere / S. Kato, C. A. Reddy, S. Matsushita // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 1970. —V. 75. —P. 2540–2550.
28. Зализовский, А.В. F-рассеяние как индикатор тропосферно-ионосферного взаимодействия / А.В. Зализовский, Ю.М. Ямпольский // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2007. — Т. 12, №1. — С.33-42.
29. Oliver, W.L. Middle and upper atmosphere radar observations of ionospheric density gradients produced by gravity wave packets / W.L. Oliver, S. Fukao, Y. Yamamoto, T. Takami, M.D. Yamanaka, M. Yamamoto, T. Nakamura, T. Tsuda // *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*. — 1994. — V. 99, Iss. A4. — P. 6321-6329.
30. Hernández-Pajares, M. Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis / M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2006. — V. 111, Iss. 7. — P. A07S11.
31. Nicolls, M. J. Three-dimensional measurements of traveling ionospheric disturbances with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar / M. J. Nicolls, C. J. Heinselman // *Geophysical Research Letters*. — 2007. — V. 34, Iss. 21. — P. L21104.
32. Sundar De, S. Heating of the auroral ionosphere by traveling ionospheric disturbances initiated by atmospheric gravity waves / S. Sundar De, B. Bandyopadhyay, S. Paul, D.K. Haldar, M. Bose // *Annals of Geophysics*. — 2010. — V. 53, No. 2. — P. 33-37.

33. Kirchengast, G. Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements / G. Kirchengast, K. Hocke, K. Schlegel // *Radio Science*. — 1995. — V. 30, No. 5. — P. 1551–1567.
34. Vadas, S. L. Sources of the traveling ionospheric disturbances observed by the ionospheric TIDDBIT sounder near Wallops Island on 30 October 2007 / S. L. Vadas, G. Crowley // *Journal of Geophysical Research*. — 2010. — V. 115. — P. A07324
35. Koucká Knížová, P. Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe / P. Koucká Knížová, Z. Mošna, D. Kouba, K. Potužníková, J. Boška // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2015. — V. 136. Part B. — P. 244–250.
36. Rishbeth, H. F-region links with the lower atmosphere / H. Rishbeth // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2006. — V. 68, No. 3-5. — P. 469-478.
37. Bourdillon, A. HF radar detection of infrasonic waves generated in the ionosphere by the 28 March 2005 Sumatra earthquake / A. Bourdillon, G. Occhipinti, J.-Ph. Molinié, V. Rannou // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2014. — V. 109. — P.75-79.
38. Orlanski, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes / I. Orlanski // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 1975. — V. 56. — P. 527–530.
39. Oliver, W. L. A climatology of F region gravity wave propagation over the middle and upper atmosphere radar. / W. L. Oliver, Y. Otsuka, M. Sato, T. Takami, S. Fukao // *Journal of Geophysical Research*. — 1997. — V. 102. — P. 14,499– 14,512.
40. Kazimirovsky, E. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it / E. Kazimirovsky, M. Herraiz, A. D. L. B. Morena // *Surveys in Geophysics*. — 2003. — V. 24, Iss. 2. — P. 139–184.

41. Djuth, F. T. A continuum of gravity waves in the Arecibo thermosphere? / F. T. Djuth, M. P. Sulzer, S. A. Gonzales, J. D. Mathews, J. H. Elder, R. L. Walterscheid // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — V. 31. — P. L16801.
42. Miyoshi, Y. Gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model / Y. Miyoshi, H. Fujiwara // *Journal of Geophysical Research*. — 2008. — V. 113. — P. D01101.
43. Vadas, S.L. Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection / S.L. Vadas, D.C. Fritts // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — V. 111. — P. A10S12.
44. Vadas, S. L. Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves / S. L. Vadas, H. Liu // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — V.114. — P. A10310.
45. Altadill, D. Origin and development of vertical propagating oscillations with periods of planetary waves in the ionospheric F region / D. Altadill, E.M. Apostolov, J.G. Sole, Ch. Jacobi // *Physics and Chemistry of the Earth*. — 2001. — V. 26 (C). — P. 387–393.
46. Altadill, D. Planetary and gravity wave signatures in the F-region ionosphere with impact on radio propagation predictions and variability / D. Altadill, E.M. Apostolov, J. Boska, J. Laštovická, P. Sauli // *Ann. Geophys.* — 2004. — V. 47, No. 2–3. — P. 1109–1119.
47. Boska, J. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere / J. Boska, P. Sauli // *Physics and Chemistry of the Earth (C)*. — 2001. — V. 26, No. 6. — P. 425–428.
48. Forbes, J.M. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere / J.M. Forbes, S. Leveroni // *Geophysical Research Letters*. — 1992. — V. 19, No. 10. — P. 981–984.

49. Laštovichka, J. Are planetary wave type oscillations in the F2-region caused by planetary wave modulation of upward propagating tides? / J. Laštovichka, P. Sauli // *Advances in Space Research*. — 1999. — V. 24. — P. 1473–1476.
50. Pancheva, D. Simultaneous observation of the quasi-two day variations in the lower and upper ionosphere / D. Pancheva, L.F. Alberca, B.A. de la Morena // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1994. — V. 56. — P. 43–50.
51. Radicella, S.M. Space Plasma Effects / S.M. Radicella, P. Sauli, N. Jakowski, D. Kouba, A. Portillo, M. Herraiz, H.J. Strangeways, N. Zernov, V. Gherm // *Ann.Geophys.* — 2009. — V. 52, No. 3–4. — P. 359–372.
52. 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.
53. Госсард, Э. Волны в атмосфере / Э. Госсард, У. Хук. — Москва: Мир, 1978. — 531с.
54. Эккарт, К. Гидродинамика океана и атмосферы / К. Эккарт — Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.— 328с.
55. Гершман, Б.Н. Динамика ионосферной плазмы / Б.Н. Гершман — Москва: Наука, 1974. — 256 с.
56. Дикий, Л.А. Теория колебаний земной атмосферы / Л.А. Дикий — Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. — 194 с.
57. Харгривс, Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды / Дж.К. Харгривс — Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. — 290 с.
58. Брюнелли, Б.Е. Физика ионосферы. / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе — Москва: Наука, 1988. — 528 с.
59. Galushko, V.G. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator / V.G. Galushko, V.V.

Paznukhov, Y.M. Yampolski, J.C. Foster // *Annales Geophysicae*. — 1998. — V. 16, Iss. 7. — P. 821-827.

60. Монин, А. С. Малые колебания атмосферы и адаптация метеорологических полей / А. С. Монин, А. М. Обухова // *Известия АН СССР, серия география и геофизика*. — 1958. — № 11. — С. 1360-1373.

61. Гохберг, М.Б. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование / М.Б. Гохберг, С.Л. Шалимов // *Российский журнал наук о Земле*. — 2000. — Т. 2, № 2. — С. 95-107.

62. Alexander, M. J. Gravity wave momentum flux in the lower stratosphere over convection / M. J. Alexander, L. Pfister // *Geophysical Research Letters*. — 1995. — V. 22, Iss. 15. — P. 2029-2032.

63. Koch, S.E. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. / S.E. Koch, R.E. Golus // *Monthly Weather Review*. — 1988. — V. 116, No. 12. — P. 2527-2592.

64. Романова, Н. Н. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации (Обзор) / Н.Н. Романова, И.Г. Якушкин // *Известия АН РАН. Физика атмосферы и океана*. — 1995. — Т.31, № 2. — С. 163-186.

65. Vadas, S. L. Horizontal and vertical propagation, and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. / S. L. Vadas // *Journal of Geophysical Research*. — 2007. — V. 112. — P. A06305.

66. Gavrilov, N.M. Dynamical and thermal effects of nonsteady nonlinear acoustic-gravity waves propagating from tropospheric sources to the upper atmosphere / N.M. Gavrilov, S.P. Kshevetskii // *Advances in Space Research*. — 2015. — V. 56, Iss. 9. — P. 1833-1843.

67. Bretherton, F.P. Group velocity and the linear response of stratified fluids to internal heat or mass sources / F.P. Bretherton // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1988. — V.45, No. 1. — P. 81-93.

68. Nicholis, M.E. Thermally forced gravity waves in an atmosphere at rest / M.E. Nicholis, R.A. Pielke, W.R. Cotton // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1991. — V.48, No. 16. — P. 1869-1884.
69. Luo, Z. Gravity waves excitation by geostrophical adjustment of the jet stream. Pt II / Z. Luo, D.C. Fritts // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1993. — V.50, No. 1. — P. 104-115.
70. Gall, R.L. Gravity waves generated during frontogenesis / R.L. Gall, R.T. Williams, T.L. Clark // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1988. — V.45, No. 15. — P. 2204-2219.
71. Craik, A. D. D. Explosive resonant wave interactions in three layer fluid flow / A. D. D. Craik, J. A. Adam // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1979. — V.92, Pt. 1. — P. 15-33.
72. Gedzelman, S. D. Short period atmospheric gravity waves / S. D. Gedzelman, R. A. Rilling // *Monthly Weather Review*. — 1978. — V.106, No. 2. — P. 196-210.
73. Nilsen, J. W. In situ observations of Kelvin-Helmholtz waves along a frontal inversion / J. W. Nilsen // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1992. — V.49, No 5. — P. 369-385.
74. Uccellini, L. W. The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances / L. W. Uccellini, S. E. Koch // *Monthly Weather Review*. — 1987. — V.115, No 3. — P. 721-729.
75. Fritts, D. C. Shear excitation of atmospheric gravity waves Pt I / D. C. Fritts // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1982. — V.39, No 9. — P. 1936-1952.
76. Fritts, D. C. Shear excitation of atmospheric gravity waves Pt II / D. C. Fritts // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1984. — V.41, No 4. P. 524-537.
77. Шакина, Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере / Н.П. Шакина. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. — 308 с.

78. Mastrantonio, G.F. Generation of gravity waves by jet streams in the atmosphere / G.F. Mastrantonio, F. Einaudi, D. Fua, D.P. Lalas // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1976. — V.33, No 9. — P. 1730-1738.
79. Chimonas, G. Shear excitation of gravity waves. Pt II: Upscale scattering from Kelvin-Helmholtz waves / G. Chimonas, J.R. Grant // *J. Atmos. Sci.* — 1984. — V.41, No. 15. — P. 2278-2288.
80. Hooke, W.H. Further study of the atmospheric gravity waves over the eastern seaboard on 18 March 1969 / W.H. Hooke, K.R. Hardy // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. — 1975. — V.14, No. 1. — P. 31-38.
81. Reed, R.G. A case study of persistent, intense, clear-air turbulence in an upper frontal zone / R.G. Reed, K.R. Hardy // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. — 1972. — V.11. — P. 541-549.
82. Davis, P.A. Resonant parallel shear instability in the stably stratified planetary boundary layer / P.A. Davis, W.R. Peltier // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1976. — V.33, No. 7. — P. 1287-1300.
83. Коваль А.В. Влияние орографических волн на общую циркуляцию и перенос озона в атмосфере: дис. ... канд. физ.-мат. наук: СПб., 2011. — 110 с.
84. Kanamori, H. Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions / H. Kanamori, J. Mori, D. G. Harkrider // *Journal of Geophysical Research*. — 1994. — V. 99, No. B11. — P. 21947–21961.
85. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы / В. М. Сомсиков. — Алма-Ата: Наука, 1983. — 192 с.
86. Сомсиков, В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором / В. М. Сомсиков // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 1991. — Т. 31, № 1. — С. 1–12.
87. Антонова, В. П. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором / В. П. Антонова, Ш. Ш. Гусейнов, В. И. Дробжев, А. Г. Зусманович, К. А. Каримов, И. Д.

Козин, Д. А. Курмангалиев, Б. Я. Лосовский, В. А. Ляджин // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1988. — Т. 24, № 2. — С. 134–143.

88. Черногор, Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия — 2008. — Т. 48, № 5. — С. 681–702.

89. Аббасов А. Р., Гусейнов Ш. Ш., Сомсиков В. М. // Астрон. циркуляр № 1259, 27 мая 1983. Изд-во Бюро астрон. сообщ. АН СССР. — С. 3.

90. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. — Москва: Наука, 1986. — 736 с.

91. Хантадзе, А.Г. Малые колебания верхней атмосферы Земли. / А.Г. Хантадзе, А. И. Гвелесиани, Г. В. Джандиери // Радиофизика и радиоастрономия. — 2007. — Т. 12, №3. — С.261-277.

92. Kaladze, T.D. Acoustic-gravity waves in the Earth's ionosphere / T.D. Kaladze, O.A. Pokhotelov, H.A. Shah, M.I. Khan, L. Stenflo // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2008. — V. 70, Iss. 13. —P. 1607-1616.

93. Hedin, A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere / A.E. Hedin // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1991. — V. 96, Iss. A2. — P. 1159–1172.

94. Karpov, I.V. Numerical study of heating the upper atmosphere by acoustic-gravity waves from a local source on the Earth's surface and influence of this heating on the wave propagation conditions / I.V. Karpov, S.P. Kshevetskii // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2017. — V. 164. — P. 89-96.

95. Савина, О.Н. Акустико-гравитационные волны в атмосфере с реалистичным распределением температуры / Савина О.Н. // Геомагнетизм и аэрномия. — 1996. — Т. 36, № 1. — С. 104-110.

96. Kshevetskii, S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases / S.P. Kshevetskii // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2001. — V.41, No. 2. — P. 273-288.
97. Kshevetskii, S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves / S.P. Kshevetskii // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2001. — V.41, No. 12. — P. 1777-1791.
98. Šindelářová, T. Observations of acoustic-gravity waves in the ionosphere generated by severe tropospheric weather / T. Šindelářová, D. Burešová, J. Chum // *Studia Geophysica et Geodaetica*. — 2009. — V. 53, Iss. 3. P. 403-418.
99. Бахметьева, Н.В. Влияние акустико-гравитационных волн на вариации параметров нижней ионосферы по наблюдениям с помощью искусственных периодических неоднородностей / Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Г.И. Григорьев, А.В. Толмачева // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2002. — Т. 45, № 3. — С. 233–242.
100. Черногор, Л.Ф. Колебания инфразвукового диапазона в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением / Л.Ф. Черногор, В.Л. Фролов, В.Ф. Пушин // *Изв. вузов. Радиофизика*. — 2012. — Т. 55, № 5. — С. 1–14.
101. Хуторова, О.Г. Мониторинг вариаций параметров тропосферы с помощью сети приемников спутниковых навигационных систем / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, В.Е. Хуторов, В.В. Калинин // *Труды XXIV всероссийской конференции «Распространение радиоволн»*. — Иркутск, 2014. — С. 272–275.
102. Фирстов, П.П. Регистрация волновых возмущений в атмосфере на полуострове Камчатка / П.П. Фирстов // *Материалы III международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений*. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВОРАН, 2004. Ч. II. — С. 131-142.

103. Fritts, D.C. Sources of mesoscale variability of gravity waves. Pt II. / D.C. Fritts, G.D. Nastrom // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1992. — V.49, No. 2. — P. 111-127.
104. Винниченко, Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере / Н.К. Винниченко, Н.З. Пинус, С.М. Шметер, Г.Н. Шур. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1976. — 336 с.
105. Черниговская, М.А. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования / М.А. Черниговская, Е.Н. Сутырина, К.Г. Ратовский // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2014. — Т. 11, № 2. — С. 264-274.
106. Кашкин, В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере. / В.Б. Кашкин // *Оптика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 26, № 10. — С. 908-916.
107. Boška, J. Diurnal variation of the gravity wave activity at midlatitudes of the ionospheric F region / J. Boška, P. Šauli, D. Altadill, G. Solé, L.F. Alberca // *Studia Geophysica et Geodaetica*. — 2003. — V. 47, Iss. 3. — P. 579-586.
108. Черногор, Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные / Л.Ф. Черногор // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2012. — Т. 52, № 6. — С. 807-817.
109. Черногор, Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ / Л.Ф. Черногор // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2012. — Т.52, № 6. — С. 818-831.
110. Baran, L.W. The response of the ionospheric total electron content to the solar eclipse on august 11, 1999 / L.W. Baran, I.I. Ephishov, I.I. Shagimuratov, V.P. Ivanov, A.F. Lagovsky // *Advances in space research (includes COSPAR information bulletin)* — 2003. — V. 31, No. 4. — P. 989-994.

111. Афраймович, Э.Л. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования в ИСЗФ СО РАН / Э.Л. Афраймович, Э.И. Астафьева, С.В. Войеков, Н.С. Гаврилюк, И.К. Едемский, И.В. Живетьев, А.Б. Ишин, Е.А. Косогоров, Л.А. Леонович, О.С. Лесюта, К.С. Паламарчук, Н.П. Перевалова, А.С. Полякова, Г.Я. Смольков, Ю.В. Ясюкевич // *Солнечно-земная физика*. — 2011. — Вып. 18. — С. 24-39.
112. Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. — Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
113. Valladares, C. E. Simultaneous observation of traveling ionospheric disturbances in the Northern and Southern Hemispheres / C. E. Valladares, J. Villalobos, M. A. Hei, R. Sheehan, Su. Basu, E. MacKenzie, P. H. Doherty, V. H. Rios // *Ann. Geophys.* — 2009. — V. 27. — P. 1501–1508.
114. Van de Kamp, M. TID characterised using joint effort of incoherent scatter radar and GPS / M. Van de Kamp, D. Pokhotelov, K. Kauristie // *Ann. Geophys.* — 2014. — V. 32 — P. 1511–1532.
115. Ogawa, T. Equatorial GPS ionospheric scintillations over Kototabang, Indonesia and their relation to atmospheric waves from below / T. Ogawa, Y. Miyoshi, Y. Otsuka, T. Nakamura, K. Shiokawa // *Earth, Planets and Space*. — 2009. — V. 61 — P. 397–410.
116. Astafyeva, E.I. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling / E.I. Astafyeva, E.L. Afraimovich, S.V. Voeykov // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 41 — P. 1459–1462.
117. Jakowski, N. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 / N. Jakowski, S.M. Stankova, V. Wilkena, C. Borriesa, D. Altadillb, J.Chum, D. Buresovac, J. Boskac, P. Saulic, F. Hruskac, Lj.R. Cander // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2008 — V. 70 — P. 836–853.

118. Шагимуратов, И.И. Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы / И.И. Шагимуратов, Ю.В. Черняк, И.Е. Захаренкова, Г.А. Якимова // Химическая физика. — 2013. — Т. 32, № 9. — С. 81–88.
119. Едемский И.К. Исследование среднемасштабных ионосферных волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором, по данным GPS: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.29 / Едемский Илья Константинович. — Иркутск, 2012. — 182 с.
120. Дробжев, В.И. Среднеширотные особенности короткопериодических возмущений в ионосфере во время прохождения солнечного терминатора / В.И. Дробжев, Д.Е. Зачатейский, П.Е. Козина, М.М. Коноплянко, Д.А. Курмангалиев, В.М. Сомсиков // Геомагнетизм и аэрномия. — 1992. — Т. 32, № 1. — С. 181-183.
121. Иванов, В.П. Сезонно суточные вариации в параметрах среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений / В.П. Иванов, В.Л. Карвецкий, Н.А. Коренькова // Геомагнетизм и аэрномия. — 1987. — Т.27, №3. — С. 511.
122. Перевалова, Н. П. Вариации характеристик акустико-гравитационных волн на основе моделирования / Н. П. Перевалова, А. С. Полякова, А. И. Погорельцев // Геомагнетизм и аэрномия. — 2013. — Т. 53, № 3. — С. 414-426;
123. Перевалова, Н. П. 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.
124. Дробжев, В. И. Лидарные исследования волновых возмущений в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором. / В. И. Дробжев, В. А.

Ляджин, В. М. Сомсиков, Б. Т. Ташенов, Д. А. Курмангалиев // Оптика атмосферы. — 1988. — Т.1, №8. — С.105-110.

125. Чунчузов, И.П. Характеристики тонкой вертикальной структуры ветра в стратосфере и нижней термосфере по инфразвуковым сигналам в области акустической тени / И.П. Чунчузов, С.Н. Куличков, О.Е. Попов, В.Г. Перепелкин, А.П. Васильев, А.И. Глушков, П.П. Фирстов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 69-87.

126. Ахмедов, Р.Р. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами / Р.Р. Ахмедов, В.Е. Куницын // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — Т.44, № 1. — С. 105-112.

127. Кшевецкий, С.П. Вертикальное распространение нелинейных гравитационных волн и их разрушение в атмосфере / С.П. Кшевецкий, Н.М. Гаврилов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — Т. 43, №1. — С. 74-82.

128. Гаврилов, Н. М. Численное исследование вертикальной структуры внутренних гравитационных волн от тропосферных источников. / Н. М. Гаврилов, В.А. Юдин // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1986. — Т. 22, № 6. — С. 563-572.

129. Gavrilo, N. M. Parametrization of momentum and energy depositions from gravity waves generated by tropospheric hydrodynamic sources / N. M. Gavrilo // Ann. Geophysicae. — 1997. — V. 15. — P. 1570-1580.

130. Карпов, И.В. Модельное исследование влияния солнечного терминатора на параметры термосферы / И.В. Карпов, Ф.С. Бессараб // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — Т. 48, №2. — С. 217—227.

131. Godin, O. A. Acoustic-gravity waves in the atmosphere generated by infragravity waves in the ocean / O. A. Godin, N. A. Zabotin, T. W. Bullett // Earth, Planets and Space. — 2015. —V. 67. —Iss. 47.

132. Yiğit, E. Modeling the effects of gravity wave momentum deposition on the general circulation above the turbopause / E. Yiğit, A. S. Medvedev, A. D.

Aylward, P. Hartogh, M. J. Harris // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2009. — V. 114. — Iss. D7.

133. Yiğit, E. Dynamical effects of internal gravity waves in the equinoctial thermosphere / A. S. Medvedev, A. D. Aylward, A. J. Ridley, M. J. Harris, M. B. Moldwin, P. Hartogh // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2012. — V. 90. — P. 104-116.

134. Goncharenko, L. Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly / L. Goncharenko, A. Coster, J. Chau, C. Valladares // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2010. — V. 115. — Is. A00G07.

135. Occhipinti, G. Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunami genic internal gravity waves / G. Occhipinti, E. A. Kherani, P. Lognonne // *Geophysical Journal International*. — 2008. — V. 173. — P. 753–765.

136. Ойнац, А.В. Метеорологические эффекты в ионосфере по данным декаметрового радара SuperDARN Хоккайдо. / А.В. Ойнац, В.И. Куркин, N. Nishitani, М.А. Черниговская // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2012. — Т. 9, №4. — С. 113-120.

137. Ming, F. Analysis of gravity-waves produced by intense tropical cyclones / F. Ming, Z. Chen, F. Roux // *Ann. Geophys.* — 2010. — V. 28. — P. 531-547.

138. Xiao, Z. Morphological features of ionospheric response to typhoon / Z. Xiao, S.-guan Xiao, Y.-qiang Hao, D.-he Zhang // *Journal of Geophysical Research*. — 2007. — V. 112, N. A4. — P. 1-5.

139. Yigit, E. Heating and cooling of the thermosphere by internal gravity waves, / E. Yigit, A.S. Medvedev // *Geophysical Research Letters*. — 2009 — V. 36. — P. L14807.

140. Черниговская, М. А. Морфологический анализ ионосферной возмущенности над Иркутском в периоды сильных метеорологических

возмущений по данным вертикального радиозондирования / М. А. Черниговская, Е.Н. Сутырина, К.Г. Ратовский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2013. — Т.10, №1. — С.142-152.

141. Гаврилов, Н. М. Об оценке интенсивности источников волновых движений по метеорологическим данным. / Н. М. Гаврилов, А. С. Медведев // Геомагнетизм и аэрономия. — 1984. — Т. 24, № 3. — С. 510 – 512.

142. Liu, H.-L. Temperature changes due to gravity wave saturation / H.-L. Liu // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2000. — V. 105, Iss. D10. — P. 12329-12336.

143. Earle, G.D. Satellite-based measurements of gravity wave-induced midlatitude plasma density perturbations / G.D. Earle, A.M. Musumba, S.L. Vadas // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — V. 113., No. A03303.

144. Altadill, D. Vertical structure of a gravity wave like oscillation in the ionosphere generated by the solar eclipse of August 11, 1999 / D. Altadill, J. G. Sole, E. M. Apostolov // Journal of Geophysical Research. — 2001. — V. 106, N. A10. — P. 21,419-21,428.

145. Chernigovskaya, M.A. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data / M.A. Chernigovskaya, B.G. Shpynev, K.G. Ratovsky // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics — 2015. — V. 136. — P. 235–243.

146. Sindelarova, T. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights / T. Sindelarova, D. Buresova, J. Chum, F. Hruska // Advances in Space Research. — 2009. — V. 43. — P. 1644–1651.

147. Polyakova, A.S. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean / A.S. Polyakova, N.P.

Perevalova // *Advances in Space Research*. — 2013. — V. 52, Iss. 8. — P. 1416-1426.

148. Зуев, В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере / В. Е. Зуев. Москва: Радио и связь, 1981. — 288 с.

149. Зуев, В.Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В.Е. Зуев, В.В. Зуев. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 231с.

150. Сулова, О.П. Динамика приземного аэрозоля по лидарным наблюдениям в Калининграде / О.П. Сулова, И.В. Карпов, Ф.С. Бессараб, А.В. Радиевский // *Вестник БФУ им. И.Канта: серия физико-математические науки*. — 2012. — Вып.4. — С. 73-77.

151. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. Москва: Мир, 1987. — 550 с.

152. Ehard, B. Long-term lidar observations of wintertime gravity wave activity over northern Sweden / B. Ehard, P. Achtert, J. Gumbel // *Ann. Geophys.* — 2014. — V. 32. — P. 1395-1405.

153. Сулова, О.П. Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы и ионосферы в периоды прохождения солнечного терминатора / О.П. Сулова, И.В. Карпов, А.В. Радиевский // *Химическая физика*. — 2013. — Т.32, №9. — С.77- 81.

154. ООО «Обнинская фотоника». Лидар ЛСА для контроля степени загрязнения природной среды. Краткое описание. Обнинск, Россия, 2005. — 8 с.

155. Банах, В.А. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере / В.А. Банах, И.Н. Смалихо. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. — 304 с.

156. Коршунов, В.А. Алгоритм автоматизированной обработки данных двухволнового лидарного зондирования на наклонных трассах. / В.А. Коршунов // *Экологическое приборостроение*. — 2009. — № 12. — С. 3 – 10.

157. Коршунов, В.А. О восстановлении интегральных параметров тропосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования / В.А. Коршунов // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 671-687.

158. 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.

159. Борчевкина, О.П. Акустико-гравитационные волны в наблюдениях тропосферных и ионосферных параметров над Калининградом / О.П. Борчевкина, И.В. Карпов, А.И. Карпов, А.В. Ильминская. // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIX Apatity Annual Seminar. — 2016. — P. 108-111.

160. Карпов, И. В. Влияние АГВ на формирование крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере. / И. В. Карпов, С. П. Кшевецкий // Современные достижения в плазменной гелиогеофизике. Электронное издание. — 2014. — С. 1-21.

161. Ерохин, Н.С. Особенности взаимодействия внутренних гравитационных волн с температурно-ветровыми структурами атмосферы при распространении в ионосферу / Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. — 2007. — Т. 2., Вып. 4. — С. 84-89.

162. Петрухин, Н.С. Безотражательные акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли / Н.С. Петрухин, Е.Н. Пелиновский, Е.К. Бацына // Геомагнетизм и аэрномия. — 2012. — Т.52, №6. — С.854-860.

163. Ясюкевич, Ю.В. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS / Ю.В. Ясюкевич, Н.П. Перевалова, И.К. Едемский, А.С. Полякова. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. — 259 с.

164. Klimenko, M. V. Modeling of local disturbance formation in the ionosphere electron concentration before strong earthquakes / M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, I. E. Zakharenkova, I. V. Karpov // *Earth, Planets and Space*. — 2012. — V. 64, Iss. 6. — P. 441-450.

165. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Захаренкова Ирина Евгеньевна. — Калининград, 2007. — 146 с.

166. Baran, L.W. The Use of GPS for Ionospheric Studies / L.W. Baran, I.I. Shagimuratov, N.J. Tepenitzina // *Artificial satellites. J. Planetary Geodesy*. — 1997. — V. 32, No. 1. — P. 49–60.

167. Picone, J.M. NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues / J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob, A.C. Aikin // *Journal of Geophysical Research*. — 2002. — V. 107. — N. A12.

168. Sauli, P. Acoustic-gravity waves during solar eclipses: detection, characterization and modeling using wavelet transforms / P. Sauli, S. G. Roux, P. Abry, J. Boska // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2007. V. 69, Iss. 17-18. — P. 2465-2484.

169. Kumar, K. V. 22 July 2009 Total Solar Eclipse induced gravity waves in ionosphere as inferred from GPS observations over EIA / K. V. Kumar, A. K. Maurya, S. Kumar, R. Singh // *Advances in Space Research*. — 2016. — V. 58, Iss. 9. — P. 1755-1762.

170. Jonesa, T.B. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse of 11 August 1999 / T.B. Jonesa, D.M. Wrighta, J. Milnera, T.K. Yeomana, T. Reida, P.J. Chapmanb, A. Seniorb // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2004. — V. 66. — P.363 – 374.

171. Karpenko, A.L. Nonlinear time series analysis of the ionospheric measurements / A.L. Karpenko, N.I. Manaenkova // *Geologische Rundschau*. — 1996. — V. 85, No. 1. — P. 124–129.

172. Houminer, Z. Improved short-term predictions of foF2 using GPS time delay measurements / Z. Houminer, H. Soicher // *Radio Science*. — 1996. — V.31, N.5. — P.1099-1108.

173. Krankowski, A. Modeling and forecasting of TEC obtained with IGS Network over Europe / A. Krankowski, L.W. Baran, I.I. Shagimuratov // *Proceed. Workshop&Simposium, 10 years IGS, Berne, Switzerland, 2004*.

174. Хромов, С.П. Метеорология и климатология / С.П. Хромов, М.А. Петросянц: учебник: — 7-е изд. Москва: Наука, 2006. — 582 с.

175. 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.

176. 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.

177. 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.

178. Деминов, М.Г. Зависимость вероятности среднеширотного F-рассеяния от солнечной и геомагнитной активностей / М.Г. Деминов, Е.В. Непомнящая // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2003. — Т. 43, № 6. — С. 763-769.

179. Пудовкин, М.И. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры / М.И. Пудовкин, О.М. Распопов // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 1992. — Т. 32, № 5. — С. 1-22.

180. Kshevetskii, S.P. Vertical propagation, breaking and effects of nonlinear gravity waves in the atmosphere. / S.P. Kshevetskii, N.M. Gavrilo //

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2005. — V. 67. — P. 1014-1030.

181. Kshevetskii, S.P. Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves / S.P. Kshevetskii // Nonlinear processes in geophysics. — 2001. — V. 8. — P. 37-51.

182. Kshevetskii, S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases / S.P. Kshevetskii // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2001. — V. 41, No. 2. — P. 273-288.

183. Kshevetskii, S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves / S.P. Kshevetskii // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2001. — V. 41, No. 12. — P. 1777-1791.