

На правах рукописи



Курдяева Юлия Андреевна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВОЛН ОТ ТРОПОСФЕРНЫХ
ИСТОЧНИКОВ В ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ**

Специальность 25.00.29 —
«Физика атмосферы и гидросферы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Калининград — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном учреждении высшего образования «Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кшевецкий Сергей Петрович

Официальные оппоненты: **Погорельцев Александр Иванович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Орлов Константин Геннадьевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «3» декабря 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.002.096.01 при Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.ifaran.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.002.096.01, канд. ф.-м. наук



Чернокульский
Александр Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Атмосфера Земли представляет собой сложную динамическую систему, которая постоянно подвергается различным воздействиям. Источники возмущений могут быть внешними (например, нагрев атмосферы Солнцем) или внутренними, то есть связанные с непосредственно происходящими в земной атмосфере процессами. Работа этих источников определяет общий энергетический баланс атмосферы. Основной перенос энергии из нижней атмосферы в верхнюю атмосферу происходит через инфразвуковые и внутренние гравитационные волны (ВГВ). Потоки энергии и импульса, переносимые атмосферными волнами из тропосферы в верхнюю атмосферу, сравнимы с энергией, получаемой атмосферным газом от солнечного излучения или других источников. Поэтому невозможно полное описание теплового режима и циркуляции верхней атмосферы без учета притоков энергии, приносимой снизу атмосферными волнами. Изменение атмосферных параметров, вызванное распространением и диссипацией этих волн, влияет на распространение электромагнитных волн в околоземном пространстве в широком диапазоне частот (частоты от КВ, УКВ до ОНЧ). Это важно учитывать при работе систем геолокации, радио- и спутниковой связи.

При изучении волновых процессов в верхней атмосфере обычно применяются экспериментальные методы исследования, которые не позволяют изучать волновые процессы в атмосфере детально. Полученные таким способом данные могут не обладать необходимым разрешением как по времени, так и по пространству. Более того, они дают возможность исследовать только эффекты, вызванные тем или иным событием, а не особенности самого процесса. Мощности вычислительных машин растут с каждым годом, поэтому применение численного моделирования для решения подобных задач позволяет изучать атмосферные процессы детально. На сегодняшний день становится возможным более качественно решать геофизические задачи, связанные с внутренними проблемами, возникающими при описании атмосферы и межслоевого взаимодействия. В отличие от экспериментальных исследований, численное моделирование позволяет изучать сами процессы, а не только эффекты, вызванные ими.

Большая часть атмосферных волн, вносящих вклад в состояние верхней атмосферы, генерируется на тропосферных высотах метеорологически-

ми источниками. Экспериментальной информации обычно недостаточно для точного задания этих источников при моделировании, так как они обладают сложной структурой, которая существенно меняется со временем. На данный момент не предложено подходов для моделирования распространения атмосферных волн, генерируемых такими сложными источниками, в верхнюю атмосферу. Разработка и исследование нового метода решения гидродинамической задачи о генерации атмосферных волн позволит эффективно моделировать атмосферные процессы различных масштабов, вызванные их распространением от тропосферных возмущений, улучшить вычислительный аппарат, применяемый в геофизических задачах и получить новые результаты, касающиеся установления волнового режима в атмосфере.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является решение задачи о распространении атмосферных волн от поля давления в верхнюю атмосферу и изучение их характеристик. Для достижения этих целей были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Поставить задачу о распространении атмосферных волн от переменного давления у поверхности Земли, исследовать её корректность, разработать метод её решения и применить его к многомасштабной модели атмосферы для последующего моделирования атмосферных процессов;

2. Выполнить тестирование развитой модели. Проверить и проиллюстрировать полученные теоретические результаты о поведении гидродинамических функций у поверхности Земли с помощью численных расчетов;

3. Провести численные расчеты с использованием экспериментальных данных о вариациях атмосферного давления, полученных в период различной активности тропосферных процессов;

4. Изучить характеристики атмосферных волн на термосферных высотах, распространяющихся от различных источников в тропосфере, определить основные эффекты в атмосфере, вызванные распространением волн и изучить их воздействие на параметры среды.

Методология и методы исследования.

Доказательство корректности задачи о распространении волн в стратифицированной атмосфере построено с использованием теории метрических (нормированных) пространств. В численных расчетах используются конечно-

разностные методы. Для тестовых проверок численной модели и теории применяются частные аналитические решения. Экспериментальные данные, используемые в прикладных расчетах, получены методами инфразвукового мониторинга у поверхности Земли и вертикального зондирования атмосферы и обработаны для последующего использования в численной модели.

Научная новизна. Впервые поставлена и исследована краевая задача для атмосферных гидродинамических уравнений о распространении атмосферных волн от колебаний давления на нижней границе в термосфере. Впервые показано, что в бездиссипативном случае решение граничной задачи о волнах от переменного давления в отсутствие начального волнового возмущения однозначно определяется только переменным полем давления на нижней границе. Впервые показано, что диссипативная задача о распространении волн от вариаций давления для однозначности решения, кроме поля давления, требует также задания горизонтальной скорости (равной нулю) и возмущения температуры (равного нулю) на нижней границе, а также задания вертикальной производной от вертикальной скорости, равной нулю. Предложен вариант постановки задачи, в котором плавно уменьшаются до нуля коэффициенты вязкости и теплопроводности у поверхности Земли. Поэтому такая модификация задачи позволяет не ставить условия на поле скоростей у поверхности Земли. Проведены исследования распространения инфразвуковых и внутренних гравитационных волн в атмосфере от вариаций атмосферного давления, задаваемых на основе экспериментальных наблюдений. Определены характерные особенности термосферных возмущений, вызываемых солнечным затмением, которые подтверждаются результатами экспериментальных исследований динамики ионосферы. Впервые дана оценка амплитуды температурных возмущений в верхней атмосфере, вызванных инфразвуковыми волнами и ВГВ от неустойчивостей, порожденных атмосферным фронтом. Изучены процессы распространения волн от вариаций давления на поверхности Земли, а также характеристики генерируемых волн.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постановка и обоснование задачи о генерации атмосферных волн переменным давлением в приземном слое атмосферы;

2. Исследование поставленной задачи показало, что в отсутствии начальных атмосферных возмущений, поле давления у поверхности Земли однозначно определяет изменение атмосферных параметров на всех высотах;

3. Результаты численных расчетов распространения атмосферных волн в период солнечного затмения. Показано возникновение волновых возмущений с периодами характерными для инфразвуковых и высокочастотных внутренних гравитационных волн и появление перемещающихся возмущений с периодом около 50 минут;

4. Результаты численных расчетов с использованием экспериментальных данных, полученных на сети микробарографов во время прихода атмосферного фронта. Нагрев верхней атмосферы волнами, генерируемыми сильным метеорологическим возмущением, оценен в 4-5 К. Впервые дана оценка амплитуды температурных волновых возмущений (100 К) и амплитуды горизонтальной скорости (60 м/сек).

Достоверность.

Достоверность материала, представленного в диссертации, обеспечивается предложенными строгими математическими доказательствами, а также тестированием модернизированной компьютерной программы, которая показала хорошее совпадение численных расчетов с точными аналитическими решениями из нужного класса решений. Достоверность прикладных расчетов обеспечивается применением апробированных методов обработки экспериментальных данных. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями и существующими представлениями о распространении атмосферных волн.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на различных международных и всероссийских научных конференциях, научных семинарах и симпозиумах: European Geosciences Union, General Assembly 2015 (г. Вена, Австрия, 2015), V International conferences «Atmosphere, ionosphere, safety» (AIS-2016, 2018) (г. Зеленоградск, Россия, 2016, 2018), The 5,6,7, 8th Workshop "Waves in inhomogeneous media and integrable systems" (г. Гданьск, Польша, 2016; г. Калининград, Россия, 2017, 2018, 2019), 11-я международная школа-конференция «Проблемы Геокосмоса» (г. Санкт-Петербург, 2016), 40-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений (г. Апати-

ты, Россия, 2017), ARISE Science meeting (г. Прага, Чешская республика, 2017), Международный Симпозиум «Атмосферная Радиация и Динамика» (ISARD-2017,2019) (г. Санкт-Петербург, Россия, 2017,2019), 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), International Association of Geomagnetism and Aeronomy Assembly /The Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics workshop on solar variability and coupling effects in the earth's atmosphere (г. Прага, Чешская республика, 2017), Международная (49-я Всероссийская) молодежная школа-конференция «Современные проблемы математики и ее приложений»(г. Екатеринбург, Россия, 2018),The 7th IAGA/ICMA/SCOSTEP Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System (г. Потсдам, Германия, 2018), Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Кемерово, Россия, 2018), Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии"(ПаВТ-2019) (г. Калининград, Россия, 2019), XVI Конференция молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом"(г.Иркутск, Россия, 2019).

Личный вклад автора в публикациях с соавторами. Опубликованные результаты исследования являются оригинальными и получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал участие в постановке задачи. Автором выполнено доказательство теорем и была произведена модификация программы «AtmoSym»: в программу была введена возможность расчёта волн от вариаций давления на поверхности Земли. Автором построены тестовые аналитические решения и выполнено сравнение численных расчетов с аналитическими. Все численные расчеты выполнены на суперкомпьютерах БФУ им. И. Канта и "Ломоносов"Московского государственного университета. Автором проведено исследование распространения атмосферных волн от источников, построенных на основе экспериментально наблюдаемых вариаций атмосферного давления у поверхности Земли, исследованы атмосферные эффекты, вызванные этими волнами.

Теоретическая и практическая значимость.

В результате проведенного исследования была разработана математическая теория, которая позволяет решать краевую задачу о распространении волн от переменного давления на нижней границе. Стало возможным использовать экспериментальные данные о вариациях давления для расчета волн в атмосфере от тропосферных возмущений у поверхности Земли. Это важно для теоретических исследований атмосферных процессов, так как достоверное задание различных тропосферных источников волн часто невозможно вследствие недостатка экспериментальной информации. Предложены нестандартные граничные условия, обеспечивающие убегание волн за границы расчетной области. Построенная модель позволяет исследовать влияние атмосферных волн, генерируемых на тропосферных высотах, на все слои атмосферы с большим пространственно-временным разрешением. Полученные результаты численного моделирования демонстрируют эффективность предложенного подхода для теоретического исследования распространения волн из нижней атмосферы в верхнюю и изучения влияния этих волн на нее.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК (Сибирский журнал вычислительной математики [A1]; Pure and Applied Geophysics [A2]; Annales Geophysicae [A3]; Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана [A4]; Химическая физика [A5]); 14 — в сборниках трудов конференций [A6]-[A19]; 1 — в других периодических изданиях [A20].

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, Список сокращений и условных обозначений, списка рисунков, списка литературы. Полный объем диссертации составляет 121 страницу с 31 рисунком. Список литературы содержит 128 наименований.

Содержание работы

Во **введении** рассмотрен вопрос важности изучения волновых процессов в атмосфере. Представлены основные проблемы, возникающие при моделировании инфразвуковых и внутренних гравитационных волн, распространяющихся от тропосферных источников. Обоснована актуальность иссле-

дований. Рассмотрены цели и поставлены основные задачи работы, сформулирована научная новизна работы и представлены защищаемые положения.

Первая глава посвящена рассмотрению основных используемых в гидродинамике уравнений и приближений. Продемонстрированы основные подходы к моделированию волновых процессов в атмосфере. Рассмотрена проблематика моделирования инфразвуковых и внутренних гравитационных волн, распространяющихся от метеорологических явлений.

При описании движения жидкости (газа) используются объединенные уравнение неразрывности и уравнения Навье-Стокса. Полученную систему уравнений замыкают закон сохранения энергии или закон неубывания энтропии. При рассмотрении уравнений гидродинамики, применяемых к атмосферным процессам, необходимо учитывать особенности планеты. К таким основным свойствам можно отнести её вращение, изменение плотности газа с высотой и то, что атмосферный газ представляет собой смесь газов и другие.

Одним из главных приближений, применяемых при изучении атмосферной динамики, является гидростатическое. Оно подразумевает возможность пренебрежения в выражении для геопотенциала (суммарный потенциал центробежных сил) во вращающейся системе. Именно в этом случае можно в качестве механически равновесного ($v = 0$) выбрать такое состояние атмосферы, при котором она вращается вместе с Землей с постоянной угловой скоростью Ω , при этом ее независимые термодинамические параметры меняются лишь по направлению радиуса Земли, или ускорения свободного падения и связаны уравнением гидростатики [1]

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\rho g. \quad (1)$$

Существуют различные крупномасштабные и климатические модели, применяемые для описания атмосферных процессов и динамики. В часто моделях используется приближение гидростатики (1), что оправдано с точки зрения масштабов моделируемых процессов, но влечет за собой некоторые проблемы – например невозможность моделирования мелкомасштабных процессов. Для учета процессов разных масштабов в численной модели необходимо отказаться от использования приближения гидростатики. Один из таких

подходов к построению негидростатической численной модели подробно описан в работе [2].

Суперкомпьютерная модель «AtmoSym» [3], [4], [5], [A9], используемая в диссертационном исследовании, создана в конце 2000-х годов, с учетом опыта уже существующих крупномасштабных моделей. Модель работает на высотах от нуля до 500 километров, позволяя эффективно разрешать мелкомасштабные процессы. Математический аппарат модели, хотя внешне похож на аппарат LES (вихрезрешающие модели) и DNS (использующие прямое численное моделирование) моделей, но в деталях отличается. При конструировании численного метода был использован аппарат обобщенных/слабых решений уравнений гидродинамики, предложенный Питером Лаксом. «AtmoSym» не использует приближение гидростатики и является неквазистатической нелинейной моделью атмосферных процессов.

Модель активно используется для решения задач, в которых исследуется распространение волн в нейтральной атмосфере на высотах верхней термосферы. Однако, исследования, посвященные теоретическому изучению распространения акустико-гравитационных в верхнюю атмосферу от метеорологических событий, пока немногочисленны. Это связано с тем, что метеорологические источники, которые необходимо задавать в модели, имеют сложную пространственную структуру, которая постоянно эволюционирует. Экспериментальной информации обычно недостаточно для дельного задания таких источников. Атмосферная конвекция, энергетически подпитываемая нагревом-охлаждением газа при фазовых переходах воды, обязательно порождает атмосферные волны. Часть генерируемых волн распространяется вверх до высот термосферы, а часть волн распространяется к поверхности Земли. Отражаясь от поверхности Земли, эти волны распространяются вверх, и вновь достигают высот, где происходят метеорологические процессы. Также волны могут влиять на уже идущие в тропосфере процессы или инициировать новые, в результате которых возникают новые волны. Распространяясь вниз, волны изменяют давление у поверхности Земли. Использование данных наблюдений вариаций давления у поверхности Земли в численных расчетах в качестве источника волн, минуя расчет самих метеорологических явлений в тропосфере, может открыть возможности для решения целого класса гео-

физических задач. Однако, для дальнейшего развития этой идеи требуется провести исследование сформулированной задачи.

Вторая глава посвящена постановке и исследованию краевой задачи о распространении атмосферных волн от вариаций давления у поверхности Земли. В данной главе представлена физически обоснованная постановка задачи и математически исследована её корректность для недиссипативной и диссипативной систем уравнений. Показаны результаты тестовых расчетов, выполненных с использованием модифицированной модели "AtmoSym".

Тропосферные тепловые источники можно считать локализованными, либо состоящими из совокупности локализованных источников небольших размеров (типичный размер от одного до нескольких километров). При нагреве атмосферного газа тепловыми источниками не существует выделенного направления распространения волн, и поэтому амплитуды волн, распространяющихся вниз и вверх от тропосферных тепловых источников, примерно одинаковы.

Распространение атмосферных волн от локального тропосферного теплового источника можно изобразить схематически (рис. 1). Предполагается, что источником является нагрев/охлаждение газа при фазовых переходах воды. Задача о распространении волн от вариаций давления у поверхности Земли нелинейна. Однако вблизи поверхности Земли амплитуда волн обычно мала из-за большой плотности газа. Ветер у поверхности Земли слабый, поэтому при качественном анализе нагрева газа тропосферными источниками можно воспользоваться понятиями линейной теории волн, без учета ветра.

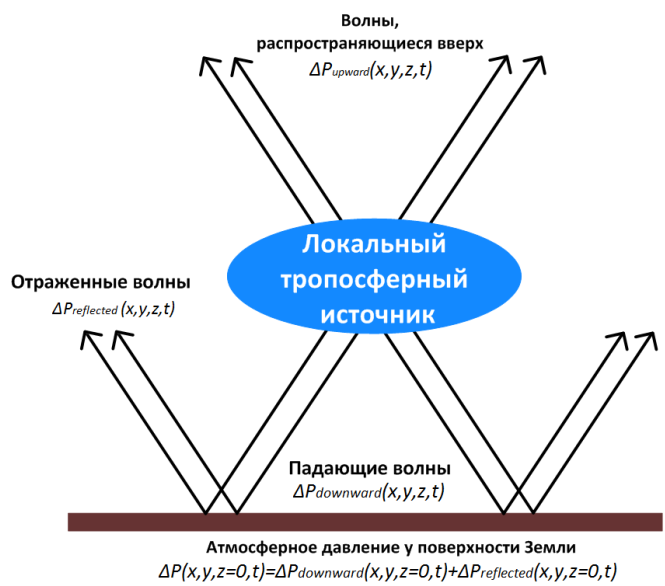


Рис. 1 — Схема распространения атмосферных волн от локального тропосферного источника тепла.

При рассмотрении и анализе процессов в околоповерхностном слое атмосферы, волновые процессы в нем можно рассматривать в терминах волн

падающих на поверхность Земли (ΔP_P) и отраженных (ΔP_O) от поверхности Земли. При линейной постановке задачи падающая (ΔP_P) и отраженная волны (ΔP_O) равны и каждая из них равна половине ΔP – волновой добавки к фоновому давлению. Тогда при рассмотрении задачи о вертикальном распространении волн от вариаций атмосферного давления в линейном приближении можно получить формулу

$$\Delta P(x, y, z = 0, t) \approx \Delta P_O(x, y, z, t) + \Delta P_{BV}(x, y, z, t), \quad (2)$$

где ΔP_{BV} – давление, создаваемое волной, распространяющиеся от источника вверх, равное отраженной волне (ΔP_O). Исходя из выражения (2), зная о изменении давления у поверхности, можно судить о распространении волн в верхнюю атмосферу, генерируемых тропосферными источниками.

Представляется разумным использовать в качестве источника вариации давления на нижней границе. Такое граничное условие ранее не использовалось при моделировании распространения волн от тропосферных источников. Поскольку с математической точки зрения могут требоваться еще какие-то условия для единственности решения, то вопрос о возможных постановках корректных задач требует специального исследования. Детально это исследование описано в работе [A1].

Система решаемых нелинейных уравнений гидродинамической модели включает в себя: уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение состояния идеального газа, уравнение сохранения энергии и уравнение для энтропии. Такая система уравнений сложна для анализа. Однако вследствие большой плотности атмосферного газа у поверхности Земли, амплитуда волн вблизи поверхности Земли обычно очень мала и изучение упрощенной, линеаризованной задачи вполне оправдано. Рассмотрим недиссипативный случай. Линеаризованная система уравнений для случая двух пространственных измерений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} (\rho_0 \Psi)_t + (\rho_0 u)_x + (\rho_0 w)_z &= 0, \\ (\rho_0 u)_t + \rho_0 g H (\Psi + \Phi)_x &= 0, \\ (\rho_0 w)_t + (\rho_0 g H (\Psi + \Phi))_z + \rho_0 g \Psi &= 0, \\ (\rho_0 \Phi)_t + (\gamma - 1) ((\rho_0 u)_x + (\rho_0 w)_z) + \frac{\alpha}{H} \rho_0 w &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В системе уравнений (3) $\Psi = \frac{(\rho(x,z,t) - \rho_0(z))}{\rho_0}$, $\Phi = \frac{(T(x,z,t) - T_0(z))}{T_0(z)}$, $H = \frac{(RT_0(z))}{g\mu}$ - высота однородной атмосферы, $\alpha = (\gamma - 1 + \gamma \frac{dH(z)}{dz})$, γ - показатель адиабаты. Величина $\rho_0 g H (\Psi + \Phi)$ имеет смысл волновой добавки к фоновому давлению. При выводе уравнений (3) предполагается отсутствие ветра, что оправдано тем, что у поверхности Земли ветер обычно слабый. Пренебрежение вязкостью и теплопроводностью тоже приемлемо, поскольку до высоты 100 километров диссипативные эффекты слабые. Рассматриваемая система уравнений двумерная; анализ трехмерной задачи аналогичен.

Поскольку рассматривается задачу о генерации волн в атмосфере граничным режимом, начальные условия соответствуют отсутствию волн при $t = 0$ и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Psi(x,y,z,t=0) &= 0, u(x,y,z,t=0) = 0, \\ w(x,y,z,t=0) &= 0, \Phi(x,y,z,t=0) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Условия на горизонтальных границах области являются периодическими

$$\begin{aligned} u(x=L_x,z,t) &= u(x=0,z,t), w(x=L_x,z,t) = w(x=0,z,t), \\ \Psi(x=L_x,z,t) &= \Psi(x=0,z,t), \Phi(x=L_x,z,t) = \Phi(x=0,z,t) \end{aligned} \quad (5)$$

Для верхней границы применяется классическое для гидродинамических задач граничное условие, которое условно называется условием непротекания

$$w(x,y,z=h,t) = 0. \quad (6)$$

Верхнее условие необходимо накладывать для корректности поставленной задачи. Нужно отметить, что через верхнюю границу волны не возбуждаются. Верхнее граничное условие не является принципиальным, поскольку нас интересует распространение волн от нижней границы и h предполагается брать большим и волны верхней границы не достигают. Поэтому верхнее граничное условие может быть заменено каким-либо другим разумным условием, приводящим к корректной задаче.

На нижней границе накладывается условие

$$f_{exp}(x,t) = \rho_0(0)gH(0)(\Psi(x,z=0,t) + \Phi(x,z=0,t)) \quad (7)$$

$P_0(z) = \rho_0(z)gH(z), f_{exp}(x,t)$ - заданная эмпирическая функция, определяемая из экспериментальных наблюдений. Теорема единственности выглядит следующим образом:

Теорема 1: Пусть существует непрерывное решение системы уравнений (3) с начальными условиями (4) и граничными условиями (5), (6), (7). Тогда оно единственно.

Доказательство стандартно для теорем единственности и использует метод от противного. Для доказательства единственности используется закон сохранения волновой энергии для уравнений в дифференциальной форме.

В результате доказательства показано, что существуют две взаимоисключающих возможности выбора нижнего граничного условия: либо должно быть задано давление, либо должна быть задана вертикальная скорость у поверхности Земли.

В диссипативной задаче система (3) дополняется членами вязкости и теплопроводности. Для упрощения будем считать, что атмосфера изотермическая. Снабдим новую систему уравнений начальными условиями (4), граничными условиями (5), и верхними граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial (T_0\Phi)}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad w|_{z=h} = 0. \quad (8)$$

Тогда теорема единственности для диссипативной задачи имеет вид:

Теорема 2. Непрерывно-дифференцируемое решение системы уравнений (23) удовлетворяющее начальными условиями (16) и граничными условиями (17), (24), (19) и условиям

$$\begin{aligned} u(x,z=0,t) &= u_0(z=0), & \frac{\partial w(x,z=0,t)}{\partial z} &= 0, \\ \Phi(x,z=0,t) &= 0, & \Psi(x,z=0,t) &= \frac{f(x,t)}{\rho_0(0)gH(0)} \end{aligned} \quad (9)$$

единственно.

Здесь $f(x, t)$ – функция, заданная на нижней границе, и имеющая смысл вариаций давления на нижней границе: $f(x, t) = \Delta P(x, z = 0, t)$. Доказательство аналогично доказательству Теоремы 1.

На основе представленных и доказанных теорем был модифицирован блок негидростатической численной модели "AtmoSym". Для системы уравнений (3) в случае изотермической атмосферы для случая двух измерений были получены стационарные аналитические решения, с помощью которых была протестирована модернизированная модель.

Результаты тестирования (рис. 2) показали хорошее совпадение аналитического и численного решения.

Теоретический результат, показывающий, что решение зависит только от давления на нижней границе, проверен численно. Температура и плотность на нижней границе были согласованы изменены так, что давление не изменилось, хотя температура и плотность были заданы другим образом. Волновая картина при этом не изменилась. Это подтверждает результаты теоретического исследования задачи.

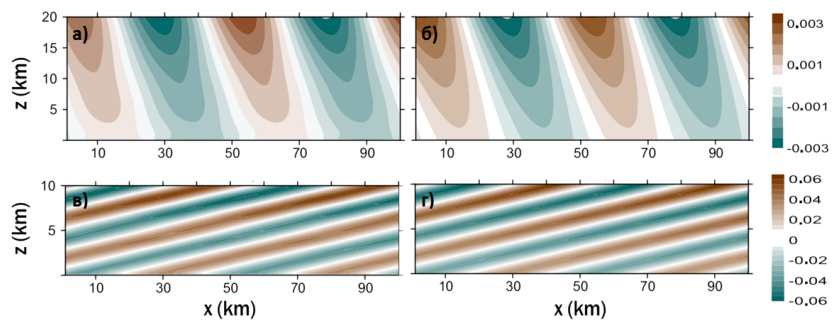


Рис. 2 — Возмущение поля температур в К инфразвуковой волной (а) – численное решение, (б) – аналитическое решение, внутренней гравитационной волной (в) – численное решение, (г) – аналитическое решение.

Также теоретические исследования показали, что у поверхности Земли температура и плотность могут изменяться скачком. Численное исследование подтвердило этот теоретический результат.

Третья глава посвящена рассмотрению особенностей моделирования распространения волн от тропосферных источников. Предложена идея задания поля давления на значительной территории. Представлены и проанализированы результаты двумерного численного моделирования распространения атмосферных волн в верхнюю атмосферу в период солнечного затмения из области солнечного терминатора в нижней атмосфере. Рассмотрен случай с использованием фонового ветра.

Обычно экспериментальные данные о вариациях давления у поверхности Земли получают для сравнительно небольших по общей площади сетях микробарографов или, нередко, на одном микробарографе. Возникает необходимость предложить физически правдоподобный подход к заданию предполагаемого источника на значительной территории. Решая данную проблему, можно предположить, что все точки пространства на значительной территории эквивалентны. Экспериментальные данные, полученные в конкретной небольшой области, могут наблюдаться в соседней области, но в другое время. Характерный размер небольших областей, в которых расстояние приблизительно постоянно, можно определить экспериментальной функцией, при которой корреляция микробарографов, находящихся на некотором расстоянии, исчезает. Поэтому, зная поведение давления только на одном микробарографе, можно задать изменение давления на значительной территории следующим образом: ввести сетку на плоскости с шагом, равным расстоянию, на котором пространственная корреляция разрушается; с каждым узлом сетки связать источник, дублирующий экспериментальный, но затухающий на расстоянии от центра по гауссовому закону; ввести случайный фазовый сдвиг, чтобы сделать источники случайными.

Проведение двумерных расчетов позволяют проверить эффективность использования этих предположений для их дальнейшего использования в подобных задачах. Для пробных численных экспериментов [A7], [A8], [A20] с использованием реальных данных в качестве источника генерации атмосферных волн были использованы данные о вариациях давления, полученные на инфразвуковой станции IS17 (6°с.ш. 5°з.д.), 10-11 апреля 2006 года во время сильной грозы. Экспериментальное исследование этого события было сделано в работе Элизабет Блан [6]. Исследование показало, что волны, генерируемые метеорологическим источником во время грозы, имеют различное направление распространения.

Эти экспериментальные данные были использованы для построения нижнего граничного условия в тестовых двумерных численных расчетах. Полученные результаты демонстрируют распространение волн в атмосфере от локального источника в виде вариаций давления на нижней границе (рис. 3(а,б)), заданного гауссовой функцией. На рисунке 3(в,г) показано изменение температуры атмосферы, вызванное распространением волн от тестового ис-

точника, распределенного вдоль нижней границы. Он задан согласно предположениям, описанным выше – с каждым узлом сетки связан новый экспериментальный источник, который постепенно затухает. Результаты показали картину, характерную для распространения волн в стратифицированной атмосфере. Похожие расчеты были выполнены в работе [А14].

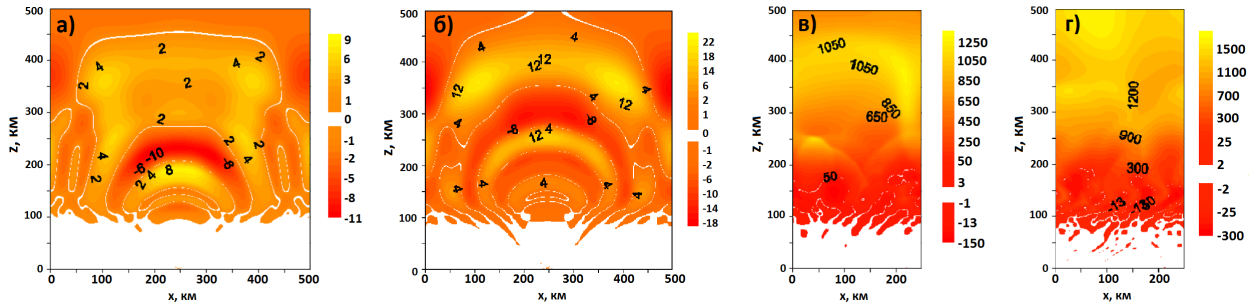


Рис. 3 — Возмущение поля температур от локального источника (а) – $t=21$ мин., (б) – $t=39$ мин.; от источников колебаний давления, распределенными вдоль нижней границы (в) – $t = 28$ мин., (г) – $t = 45$ мин. Двумерные расчеты.

Однако не всегда есть возможность использовать экспериментальные данные о вариациях давления, полученные на таких устройствах высокого разрешения как микробарографы. Это заставляет искать косвенные способы получения нужных экспериментальных данных для использования их в численных расчетах. Использование экспериментальных данных, полученных путем наземного зондирования атмосферы, и последующее их приведение к вариациям давления данных, представляется разумным. Такой подход позволит изучать волны, вызванные не только различными метеорологическими событиями, но и другими источниками тропосферных возмущений.

Так, одним из регулярных источников возмущений атмосферы является солнечный терминатор (СТ). Однако, при исследовании распространения волн из области солнечного терминатора, процессы и эффекты, вызванные их распространением, недостаточно изучены. Это обусловлено недостатком разрешающей способности оборудования или упрощениями, используемыми при моделировании, вследствие чего не представляется возможным рассмотреть весь спектр колебаний.

В проведенном численном эксперименте для определения вариаций давления, вызванных распространением атмосферных волн в период солнечного затмения в нижней атмосфере, использовались результаты лидарного зондирования нижней атмосферы, выполненные в Калининграде в день про-

хождения солнечного затмения 20 марта 2015 года [7]. Предполагается, что вариации интенсивности лидарного сигнала отражают частотные характеристики вариаций давления на фиксированной высоте. Для задания граничных условий на нижней границе расчетной области предполагалось, что наблюдаемые вариации нижней атмосферы создаются подвижными источниками (солнечный терминатор и солнечное затмение), распространяющимися вдоль нижней границы со скоростью солнечного терминатора на широте Калининграда $V = 270$ м/с.

Результаты численных расчетов показали, что возмущения, вызванные распространением волн из области солнечного терминатора и солнечного затмения в нижней атмосфере, преимущественно отмечаются изменением параметров среды с периодами около 4-10 минут. Наряду с возмущениями, появляющимися в период прохождения солнечного терминатора и затмения, отмечается появление перемещающихся возмущений, распространяющихся как в направлении движения области терминатора и затмения, так и в противоположном направлении. В верхней термосфере характерный период таких возмущений порядка 50 минут. Направление распространения таких возмущений противоположно движению области солнечного терминатора и затмения.

Описанные выше результаты подтверждаются результатами ионосферных наблюдений. Так, в работе [8] отмечалось, что в периоды прохождения солнечных затмений усиливается волновая активность в диапазоне инфразвуковых волн с периодами 3-5 минут и внутренних гравитационных волн с периодами до 60-80 минут. В наблюдениях динамики ионосферы в период солнечного затмения в 20.03.2015 отмечается появление распространяющихся возмущений с характерным периодом около 50 минут [9]. Причиной такой реакции ионосферы могут являться процессы в термосфере, развивающиеся в период прохождения солнечного затмения. Таким образом, использование граничных условий, предложенных в Главе 2, позволило рассчитать распространение волн от других источников, которые влияют на установление волнового режима в атмосфере. Результаты моделирования распространения волн из области СТ хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями. Высокое временное разрешение позволяет более детально изучить процессы, возникающие во время этого события.

Рассмотрена проблематика моделирования распространения волн верхнюю атмосферу. Представлены результаты двухмерных расчетов с учетом работы фонового ветра. Численные расчеты с использованием ветрового профиля показали, что влияние ветра может быть существенным, но тем не менее для изучения основных характеристик волн и возможных эффектов, которые эти волны могут вызвать, необходимо прежде всего рассматривать безветренную атмосферу.

В четвертой главе представлены результаты трехмерного моделирования распространения волн от атмосферного фронта в московском регионе. Обработаны данные экспериментальных наблюдений на сети из 4-х микробарографов вариаций давления на поверхности Земли в московском регионе. Выделен случай сильных колебаний давления, когда вариации давления превышали среднестатистические в 30 раз. Для этого случая построены эмпирические аппроксимации колебаний поля атмосферного давления, которые были использованы в качестве нижнего граничного условия для расчета вертикального распространения акустико-гравитационных волн от вариаций приземного давления. В отличие от двухмерных расчетов, продемонстрированных в главе 3, были проведены реалистичные трехмерные расчеты. Полученные результаты позволили впервые дать оценку амплитуд акустико-гравитационных волн на термосферных высотах, вызванных метеорологическим источником в тропосфере.

Для расчетов были использованы экспериментальные данные изменения давления со временем, записанные микробарографом Института Физики Атмосферы имени А.М. Обухова РАН (Москва, $55^{\circ}7$ с.ш. $37^{\circ}6$ в.д.) 9 апреля 2016г. Предполагая, что волновой источник локализован на поверхности Земли, в окрестности микробарографа поверхностное давление аппроксимируется гауссианом. Вычисленное Температурное поле для $t \approx 30$ минут и

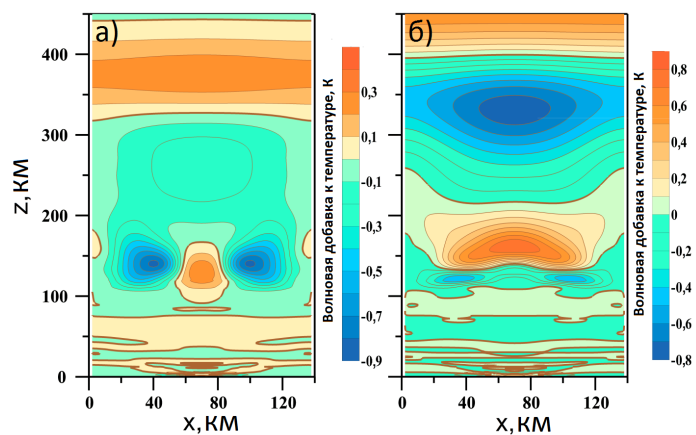


Рис. 4 — Сечение вертикальной плоскостью поля температуры от источника в момент времени (а) $t = 30$ мин., (б) $t = 45$ мин.

$t \approx 45$ минут после активации такого источника аволны показаны на рисунках 4а и 4б, соответственно. Инфразвуковые волны и ВГВ распространяются от источника и амплитуда волн растет с высотой. Такие волны не имеют больших амплитуд, потому что используемые экспериментальные данные давления соответствуют спокойным метеорологическим условиям вблизи места наблюдения. В тропосфере поле давления зависит от горизонтальной координаты, располагающейся вдоль поверхности земли. В связи с этим, приземные вариации давления могут быть не локализованы в пространстве и времени.

Используемый источник волн дает волновую картину от локального источника волн. Этого достаточно, чтобы продемонстрировать способность модели «AtmoSym» вычислять вертикальное распространение волн от вариаций давления на нижней границе в трехмерном варианте. Однако для оценки влияния тропосферных возмущений на верхнюю атмосферу нужен более реалистичный источник. Более реалистичные поля давления на поверхности Земли для численного моделирования были получены с применением данных наблюдений, полученных в 2016 году на 4 микробарографах, ИФА им. А.М. Обухова РАН, расположенных в московском регионе. Данные за год были обработаны и выделены случаи, когда амплитуды вариаций давления существенно превышали фоновые. Амплитуда вариаций давления в отдельные моменты 18 июля 2016 года превышала среднюю за 2016 год в 30 раз. Эти данные о вариациях давления были выбраны для выполнения численных расчетов. Расстояние между источниками в трехмерном расчете было задано согласно их реальному расположению.

Для анализа региональной метеорологической обстановки в нижней атмосфере в исследуемый период использовались данные наблюдений, доступные в базе данных MERRA-2, и система данных EOSDIS(NASA). Проведенный анализ показал, что вариации давления, полученные на микробарографах могут быть ассоциированы с наблюдаемыми метеоявлениями, соответствующим развитой неустойчивости в атмосфере при распространении атмосферного фронта. Полученные данные о вариациях давления можно однозначно связать с прохождением атмосферного фронта.

Размер расчетной области в горизонтальной плоскости подбирался экспериментально. Для сравнения проведены расчеты для двух разных областей. Было изучено влияние периодических условий на интересующие харак-

теристики волн. Результаты расчетов показали, что при выбранной области горизонтальные границы влияют слабо (рис. 5). Существенных различий в волновых картинах между областями не наблюдается. Возникшие волны имеют разнообразные масштабы. У возмущений малых масштабов размер полу-волны около 50 километров. У возмущения наибольшего масштаба размер полу-волны примерно 600 километров. Основной нагрев среды волнами имеет место на высотах от 100 до 200 километров и горизонтальная структура возмущения на этих высотах очень изменчива. Нагрев среды существенен также на высотах выше 300 километров, на расстояниях по горизонтали до 250-300 километров от центра источника. Сравнение рассмотренного случая экстремальных колебаний давления со среднестатистическими волновыми колебаниями давления на поверхности Земли дают оценку амплитуды типичных колебаний температуры, обусловленных распространением атмосферных волн снизу, примерно $T = 4-5$ К.

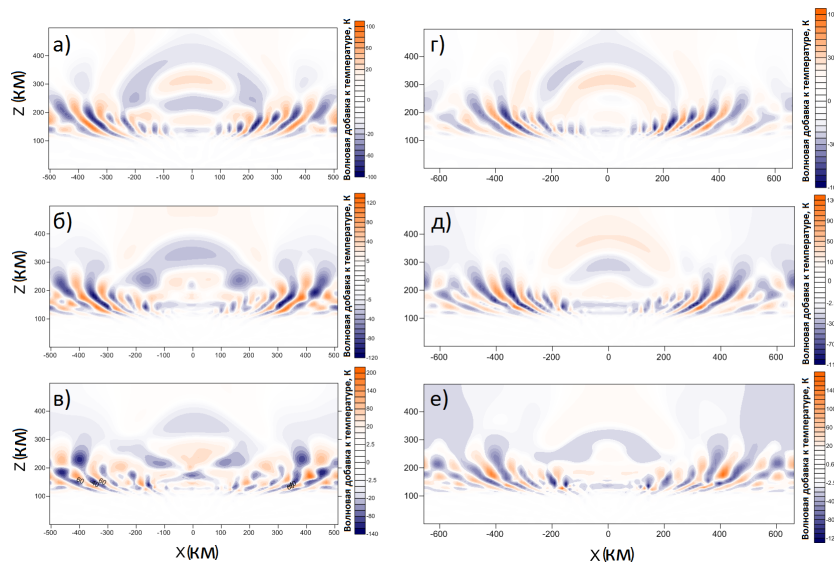


Рис. 5 — Сечение вертикальной плоскостью поля температуры при $t=1$ час 30 мин., $t=2$ часа, $t=2$ часа 30 мин. для области 1020×1020 километров – (а), (б), (в) и для области 1320×1320 километров – (г), (д), (е) соответственно.

Волны в расчетах создаются совокупностью четырех граничных источников у поверхности Земли, и волновое поле вблизи источников несимметрично. Однако по мере удаления волн от источников, генерируемые различными источниками волны интерферируют таким образом, что волновое поле приобретает вид волнового поля от некоторого единого точечного источника. Это наблюдение привело к идее использования в расчетах нестандартных непериодических асимметричных (различных по знаку) граничных условий

для горизонтальных компонент скорости. Сравнение результатов расчетов с разными горизонтальными граничными условиями показали, что до определенного момента (около 1 часа 30 минут) они почти не влияют на результаты расчетов. Именно на этих временах удобно проанализировать полученные амплитуды.

Расчеты, выполненные с периодическими граничными условиями, показаны на рис. 6(а, б). Здесь показано волновое поле через 1 час 31 минуту после включения источника волн. Амплитуда температурного волнового возмущения в верхней атмосфере примерно 100 К, амплитуда горизонтальной скорости примерно 60 м/сек.

На Рис.6(в, г) показано распространение той же волны, что и на рис 6(а, б), но на одну минуту раньше. Видно, что за 1 минуту что за 1 минуту волновая картина существенно изменилась ясно указывают на то, что наблюдаемая волновая картина сформирована преимущественно акустическими (инфразвуковыми) волнами. Для внутренних гравитационных волн различие во времени только в 1 минуту несущественно.

На больших временах влияние граничных условий является значительным. Для исследования атмосферных эффектов необходимо сравнивать результаты с периодическими и непериодическими ассиметричными условиями одновременно.

В левой колонке Рис. 7

показаны результаты расчетов с периодическими граничными условиями по горизонтали, а в правом с непериодическими ассиметричными. Существенное различие графиков левого столбца от графиков правого столбца, нарастающее со временем, что несомненно свидетельствует о влиянии конечности расчетной области, которую определяют горизонтальные граничные условия, на результаты расчетов. Волновая картина Рис. 7 видимо, создана в основном инфразвуковыми волнами. Волновые поля на рис. 7(в, з) и на 7(г, и) отличаются весьма существенно. Представленные картинки отстают во времени

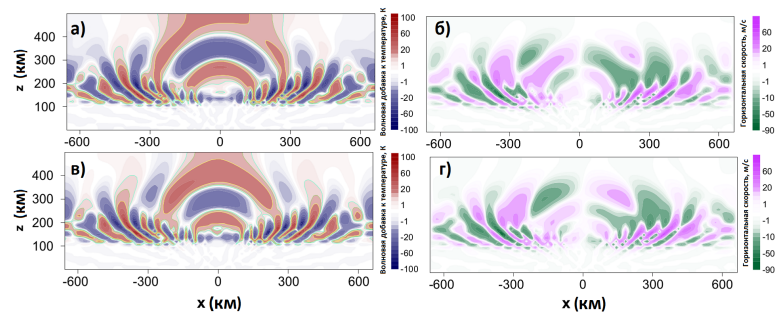


Рис. 6 — Сечение вертикальной плоскостью поля температуры при $t=1$ час 31 минут (а) и поля горизонтальной скорости (б) при $t=1$ час 30 минут (в) и (г) соответственно.

только на 3 минуты. Только акустические (инфразвуковые) волны могут обеспечить существенное изменение волновой картины за столь малое время.

Конечность расчетной области на рассматриваемых больших временах уже влияет на волновые поля, тем не менее, амплитуды волн не зависят от того, какие граничные условия по горизонтали были использованы. Амплитуды волн стабилизировались и равны примерно 100 К для температурных возмущений.

Левая панель на рис.7 соответствует расчетам с периодическими граничными условиями, которые должны приводить к отражению волн от горизонтальных границ. Однако мы не видим в верхней атмосфере хорошо знакомой картины отражения волн, вероятно, потому что источник волн расположен внизу у поверхности Земли и отраженные волны распространяются назад-вверх, а не просто назад. Кроме этого, в верхней атмосфере очень велика роль вязкости и теплопроводности, что делает картину отражения волн нечеткой.

На правой панели (рис. 7) наблюдаются обширные нагретые области атмосферы. Нагрев среды волнами на правых графиках Рис. 7 не является неустойчивостью новой граничной задачи, поскольку он возникает не на горизонтальных границах области, а в центре расчетной области, и распространяется к границам. Кроме этого, неустойчивости нарастают, в то время как нагрев на графиках правой панели рисунка 7 достиг некоторого порога (примерно 15К в области шириной 500 километров и 5К в области шириной 1000 километров над источником волн), и температура стабилизировалась. Нагретая об-

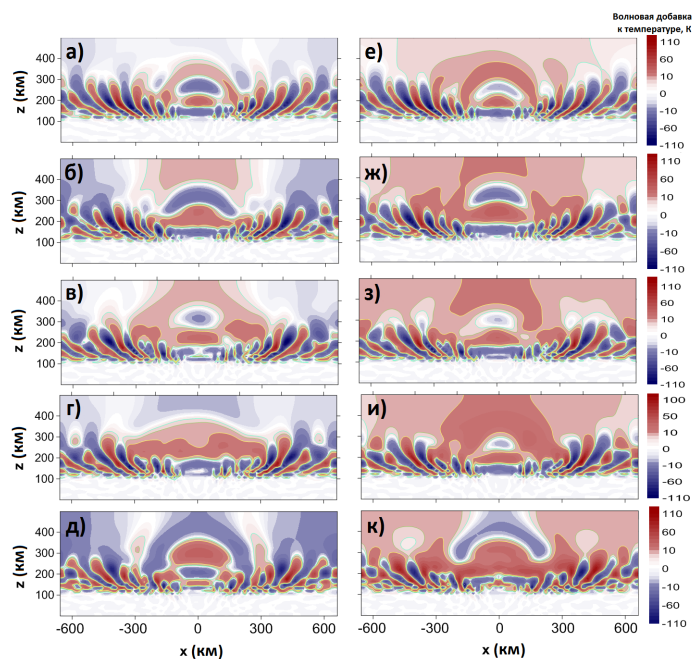


Рис. 7 — Сечение вертикальной плоскостью поля температуры при $t=1$ час 50 мин, 1 час 59 мин, 2 часа 11 мин, 2 час 14 мин, 2 час 31 мин для периодических граничных условий – (а), (б), (в), (г), (д) и для неперидических граничных условий – (е), (ж), (з), (и), (к).

ласть ведет себя как волновое возмущение и временами температура газа в нагретой области может падать, оставаясь, однако, выше фоновой. Эти особенности указывают, что появление нагретой области выше 300 километров, изображенной в правой колонке рис. 7, вероятно связано с приходом очень длинных акустических (инфразвуковых) волн.

Отсутствие значительных эффектов, вызванных распространением ВГВ, вероятно связано с их медленным распространением и наличием тропосферного квазиволновода, обусловленного температурным режимом в атмосфере. Время распространения ВГВ до высот термосферы превышает время расчетов.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. В работе была поставлена и исследована краевая гидродинамическая задача о генерации волн переменным давлением на нижней границе. Доказана единственность решения поставленной задачи, предложен метод решения поставленной задачи. Полученный теоретический результат показал, что решение зависит от давления на нижней границе, но не зависит от деталей поведения температуры и плотности на границе, при условии, что они соответствуют одному и тому же давлению.
2. В соответствии с новой поставленной задачей была модифицирована трехмерная нелинейная численная модель атмосферных процессов «AtmoSym». Выполнены тестовые расчеты. Сравнение аналитического и численного решения показали хорошее согласие.
3. Теоретические исследования выявили, что у нижней границы плотность и температура могут изменяться скачком. Этот теоретический результат подтверждается численными расчетами. В нелинейном случае на скачке могут развиваться осцилляции, которые могут быть источником паразитных волн, то есть, создавать шумовые волны. Чтобы этому воспрепятствовать, при численном решении задачи у самой границы, было использовано линеаризованное уравнение для вертикальной скорости. Это допустимо, так как амплитуда волн у поверхности Земли очень мала.
4. Анализ результатов трехмерных расчетов волн от вариаций давления на нижней границе позволил поставить нестандартные граничные условия, учитывающие убегание волн за горизонтальные границы расчетной области, на горизонтальных границах расчетной области.
5. Используя разработанные методы и нелинейную модель атмосферных процессов, проведен цикл численных экспериментов с использованием данных

наблюдений вариаций давления у поверхности Земли, ассоциированных с различными тропосферными источниками. Результаты моделирования хорошо согласуются с представлениями о вертикальном распространении волн в атмосфере. Выявлены особенности эффектов, вызванных распространением волн от таких источников:

а) внутренние гравитационные волны преимущественно попадают в атмосферный волновод на высотах порядка 200 километров, в то время как инфразвуковые волны уходят на термосферные высоты, где начинают диссипировать;

б) в нижней атмосфере в период солнечного затмения усиливаются процессы генерации инфразвуковых и внутренних гравитационных волн с периодами 4-10 минут. Такие волны, распространяясь практически вертикально, достигают высот термосферы и, вследствие процессов диссипации волн, возбуждают крупномасштабные возмущения с характерным периодом около 50 минут, распространяющихся в противоположном направлении, по отношению к направлению перемещения области терминатора солнечного затмения;

в) амплитуда типичных колебаний температуры, обусловленных распространением инфразвуковых и внутренних гравитационных волн снизу, оценена в 4-5 К;

г) в создаваемых волновых возмущениях в верхней атмосфере лидирующая роль принадлежит инфразвуку. Амплитуда температурных волновых возмущений в верхней атмосфере равна 100 К, амплитуда горизонтальной скорости 60 м/сек.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Курдяева Ю.А. Исследование корректности задачи о распространении нелинейных акустико-гравитационных волн в атмосфере от переменного давления на нижней границе / Ю. А. Курдяева [и др.] // Сиб. журн. вычисл. математики РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск. — 2017. — Т. 20, № 4. — С. 391–408.
- A2. Kurdyayeva Y.A. Correct boundary conditions for the high-resolution model of nonlinear acoustic-gravity waves forced by atmospheric pressure variations / Y.A. Kurdyayeva [et al.] // Pure and Applied Geophysics. — 2018. — V. 175, № 10. — Pp. 3639–3652.

- A3. *Kurdyayeva Y., Kulichkov S., Kshevetskii S., Borchevkina O., and Golikova E.* Propagation to the upper atmosphere of acoustic-gravity waves from atmospheric fronts in the Moscow region // *Annales Geophysicae*. — 2019, — V.37, N.3, — Pp. 447-454.
- A4. *Курдяева Ю.А., Куличков С.Н., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Голыкова Е.В.* Вертикальное распространение акустико-гравитационных волн от атмосферных фронтов в верхнюю атмосферу // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. — 2019. — Т. 55. № 4. — С. 3-12.
- A5. *Дьяков Ю.А.* Вертикальное распространение акустико-гравитационных волн из нижней атмосферы в период солнечного затмения / Ю. А. Дьяков [и др.] // *Химическая физика*. — 2020, — V.39, N.4, — Pp. 1-8.
- A6. *Kurdyayeva Y.A., Karpov I.V., Borchevkina O.P., Vasilev P.A., Kshevetskii S.P.* Simulation of the upper atmosphere disturbances produced by acoustic-gravity waves propagated from the solar terminator in the troposphere // *Proceedings of the 11th Intl School and Conference “Problems of Geocosmos”*. — 2016. — Pp. 248-254.
- A7. *Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Karpov I.V., Kurdyayeva Y.A.* Generation of Large-scale Thermospheric Disturbances and Thermosphere Heating by Infrasonic Waves Propagated from Tropospheric Sources // *Geophysical Research Abstracts*. — 2015. — Vol. 17. — EGU2015-4107-1.
- A8. *Kshevetskii S.P., Kurdyayeva Y.A., Gavrilov N.M., Karpov I.V.* Simulation of Vertical Propagation of Acoustic-Gravity Waves in the Atmosphere based on Variations of Atmospheric Pressure and Research of Heating of the Upper Atmosphere by Dissipated Waves // *Proceedings of V International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety*. — Kaliningrad. — 2016. — Pp. 468–473.
- A9. *Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Kurdyayeva Y.A.* The Supercomputer Model of Atmospheric Processes of Common Access Shared Via the Internet // *Proceedings of V International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety*. — Kaliningrad. — 2016. — С. Pp. 474–479.

- A10. *Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M.* Simulation of acoustic-gravity waves from atmospheric pressure variations and their influence on the high atmosphere // *Geophysical Research Abstracts*. — 2017. — Vol. 19. — EGU2017-7271.
- A11. *Курдяева Ю.А., Кшевецкий, С.П., Гаврилов, Н.М.* исследование корректности задачи о распространении акустикогравитационных волн в атмосфере от вариаций атмосферного давления на поверхности Земли // Тезисы в сборнике Международный Симпозиум «Атмосферная Радиация и Динамика» (МСАРД – 2017). — 2017. — С. 203.
- A12. *Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П.* Моделирование распространения акустико-гравитационных волн от вариаций атмосферного давления // Труды Международной (48-й Всероссийской) молодежной школы-конференции «Современные проблемы математики и ее приложений». — Екатеринбург. — 2018. — С. 131.
- A13. *Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S.P., Kulichkov S.N., Golikova E.V.* Numerical Simulation of Wave Propagation from Atmospheric Pressure Variations Registered with the Microbarographs Net in Moscow and Environs // *Proceedings of VI International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety*. — Kaliningrad. — 2018. — Pp. 155-159.
- A14. *Borchevkina O.P., Karpov M.I., Kurdyayeva Y.A., Vasiliev P.A., Karpov I.V.* Troposphere and Ionosphere Variations under Meteorological Disturbances in April 2016 // *Proceedings of VI International conference Atmosphere, Ionosphere, Safety*. — Kaliningrad. — 2018. — Pp. 136 -141.
- A15. *Курдяева Ю.А.* Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн от вариаций давления на поверхности земли, заданных на нижней границе // Тезисы XIX всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. — Новосибирск. — 2018. — С. 27-28.
- A16. *Kshevetskii S.P., Kurdyayeva Y.A., Kulichkov S.N., Borchevkina O.P.* Numerical Simulation with the "Lomonosov" Supercomputer, of the Waves, Generated by the Variable Atmospheric Pressure Recorded by the Network of Microbarographs // *Короткие статьи и описания плакатов XIII Меж-*

дународной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии"(ПаВТ-2019). — 2019. — С. 445.

- A17. Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П. Численное моделирование распространения волн от переменного давления на поверхности земли, зарегистрированного сетью микробарографов // Статья в сборнике трудов VIII международной конференции «Волны в неоднородных средах и интегрируемые системы». — 2019. — С. 17 — 21.
- A18. Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Куличков С.Н., Борчевкина О.П. Численное моделирование вертикального распространения в верхнюю атмосферу акустико-гравитационных волн от атмосферных фронтов // Тезисы в сборнике Международный Симпозиум «Атмосферная Радиация и Динамика» (МСАРД – 2019). — 2019. — С. 240.
- A19. Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Куличков С.Н., Борчевкина О.П. Исследование Распространения Акустико-Гравитационных Волн от Тропосферных Источников в Верхнюю Атмосферу // Труды Международной Байкальской Молодежной Научной Школы по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XVI Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». — 2019. — С. 342–344.
- A20. Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А. Численное исследование влияния акустико-гравитационных волн от источника давления на поверхности Земли на температуру термосферы // Труды Кольского научного центра РАН. — 2016. — Т. 4, №38. — С. 161-166.

Список литературы

1. Гинзбург Э. И., Гуляев В. Т., Жалковская Л. В. Динамические модели свободной атмосферы. — Новосибирск : Наука: Сиб. отд-ние, 1987. — 290 с.
2. Кшевецкий С. П. Теория и численное моделирование распространения и разрушения внутренних гравитационных волн в атмосфере: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29. — Санкт-Петербург, 2003. — 281 с.

3. *Кшевецкий С.* Моделирование распространения внутренних гравитационных волн в газе // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2001. — Т. 41, № 2. — С. 295—310.
4. *Кшевецкий С.* Численное моделирование нелинейных внутренних гравитационных волн // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2001. — Т. 41, № 2. — С. 1870—1885.
5. *Kshevetskii S. P.* Analytical and numerical investigation of non-linear internal gravity waves // Nonlinear Proc. Geoph. — 2001. — Vol. 41, no. 8. — Pp. 37–53. — DOI: 10.5194/npg-8-37-2001.
6. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in Western Africa / E. Blanc [et al.] // Journal of Geophysical Research. — 2014. — Vol. 119, no. 11. — Pp. 6409–6418. — DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020499>.
7. *Борчевкина О., Карпов И., Карпов А.* Наблюдения акустико-гравитационных волн в период солнечного затмения 20 марта 2015 года в Калининграде // Химическая физика. — 2017. — Т. 36, № 12. — С. 51—55.
8. *Черногор Л.* Эффекты солнечных затмений в ионосфере. 1. Экспериментальные данные // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — Т. 52, № 6. — С. 807—818.
9. Observation and characterization traveling ionosphere disturbances induced by solar eclipse of 20 march 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks / S. Panasenko [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2019. — Vol. 191, no. 6. — Pp. 807–818.