

УТВЕРЖДАЮ

ВРиО ректора

А.А.Федоров

2020 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

«Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Диссертация «Численное моделирование распространения атмосферных волн, обусловленных тропосферными источниками» выполнена в Институте физико-математических наук и информационных технологий БФУ им. И. Канта.

В 2014 г. окончила ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по специальности «Организация и технология защиты информации».

В период подготовки диссертации соискатель Курдяева Юлия Андреевна обучалась в аспирантуре в период 2014 – 2018 гг. в ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». Справка об обучении № 3339 от 17.12.2019 г. выдана в 2019 г. ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

В период 2018 по настоящее время обучается по программе магистратуры в ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». В период с 2018 по настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в ФБГУН «Калининградский филиал Института земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН». В период с 31.10.2019 г. по настоящее время является экстерном ФБГУН



«Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН», зачисленным для прохождения промежуточной аттестации – сдачи кандидатского экзамена без освоения программы подготовки научно-педагогических кадров по направлению 05.06.01 «Науки о Земле» (научная специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы).

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Кшевецкий Сергей Петрович, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»;

Тема утверждена на заседании Научно-технического совета Института физико-математических наук и информационных технологий БФУ им. И. Канта 11.11.2019 г., протокол № 6/2019.

По результатам рассмотрения диссертации «Численное моделирование вертикального распространения волн от тропосферных источников в верхнюю атмосферу» принято следующее заключение:

Диссертационная работа Ю.А. Курдяевой посвящена теоретическому исследованию распространения атмосферных волн от тропосферных возмущений в верхнюю атмосферу. Диссертантом проделан обширный цикл работ и получены следующие **результаты**:

1. Обоснована и поставлена задача о генерации атмосферных волн переменным давлением в приземном слое атмосферы.
2. Выполнено математическое исследование поставленной задачи показало, что в отсутствии начальных атмосферных возмущений, поле давления у поверхности земли однозначно определяет изменение атмосферных параметров на всех высотах.
3. Выполнены численные расчеты распространения атмосферных волн из области солнечного терминатора и в период солнечного затмения, выполненные с использованием предложенного нового подхода, показали возникновение волновых возмущений с периодами характерными для инфразвуковых и высокочастотных внутренних гравитационных волн и появление перемещающихся возмущений, с характерным периодом порядка 50 минут;



4. Выполнены трехмерные расчеты с использованием экспериментальных данных, полученных на сети микробарографов во время прихода атмосферного фронта, позволили оценить нагрев верхней атмосферы волнами, обусловленный распространением и диссипацией атмосферных волн от неустойчивостей на атмосферном фронте в 4-5 К. Также впервые дана оценка амплитуды температурных волновых возмущений (100К) и амплитуды горизонтальной скорости (60 м/сек) в верхней атмосфере во время прихода атмосферного фронта.

**Личный вклад автора.** 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" МГУ. Автором также выполнены прикладные расчеты, проведено исследование распространения атмосферных волн от источников, построенных на основе экспериментально наблюдаемых вариаций атмосферного давления у поверхности Земли, исследованы атмосферные эффекты, вызванные этими волнами.

**Степень достоверности результатов** обеспечивается примененными строгими математическими доказательствами, а также тестированием модернизированной численной модели атмосферы, которое показало хорошее совпадением численных расчетов с точными аналитическими решениями из нужного класса решений. Достоверность прикладных расчетов обеспечивается также применением апробированных методов обработки экспериментальных данных. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями и существующими представлениями о распространении атмосферных волн.



**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем.

1. Впервые поставлена и исследована краевая задача для атмосферных гидродинамических уравнений о распространении атмосферных волн от колебаний давления на нижней границе в термосферу.

2. Впервые показано, что в бездиссипативном случае решение граничной задачи о волнах от переменного давления 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 поверхности, а также задания вертикальной производной от вертикальной скорости, равной нулю. 3. Предложен вариант постановки задачи, в котором плавно уменьшаются до нуля коэффициенты вязкости и теплопроводности у поверхности Земли, так как в атмосфере вязкость и теплопроводность пренебрежимо малы до высоты 100 км. Такая модификация задачи позволяет не ставить условия на поле скоростей у поверхности Земли.

3. Проведены исследования распространения инфразвуковых и внутренних гравитационных волн в атмосфере от вариаций атмосферного давления, задаваемых на основе экспериментальных наблюдений. Определены характерные особенности атмосферных 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 параметры генерируемых волн.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**



### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

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 на поверхности Земли. Это важно для теоретических исследований атмосферных процессов, так как детальная экспериментальная информация о тропосферных источниках волн часто отсутствует и ее сложно получить вследствие сложной трехмерной структуры метеорологических источников. 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 изучения распространения волн из нижней атмосферы в верхнюю и влияния на неё и могут быть использованы при решении практических задач, связанных с работой систем геолокации, радио- и спутниковой связи.

**Ценность** диссертационной работы в постановке и исследовании концептуально новой геофизической задачи, которой по приземным изменениям поля давления, вызванным тропосферными источниками, определяется поведение гидродинамических функций на всех атмосферных высотах.

### **Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:**

1. Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Гаврилов Н.М., Голикова Е.В. Исследование корректности задачи о распространении нелинейных акустико-гравитационных волн в атмосфере от переменного давления на нижней границе // Сиб. журн. вычисл. математики РАН. Сиб. отд-ние. – Новосибирск. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 391–408.



2. 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.

3. Дьяков Ю. А., Курдяева Ю. А., Борчевкина О. П., Карпов И. В., Адамсон С. О., Голубков Г. В., Ольхов О. А., Песков В. Д., Родионов А. И., Родионова И. П., Шаповалов В. Л., Шестаков Д. В., Голубков М. Г. Вертикальное распространение акустико-гравитационных волн из нижней атмосферы в период солнечного затмения // Химическая физика. – 2020. – Т. 39. № 4. – С. 1-8.(ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ)

**в том числе, опубликованные в рецензируемых иностранных научных журналах, определенных ВАК**

4. Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S., Gavrilov N.M., and Kulichkov S. Correct boundary conditions for the high-resolution model of nonlinear acoustic-gravity waves forced by atmospheric pressure variations // Pure and Applied Geophysics. – 2018. – V. 175, № 10. – Pp. 3639–3652.

5. 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.

**Другие публикации:**

1. 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.

2. 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.

3. Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Karpov I.V., Kurdyaeva 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.

4. Kshevetskii S.P., Kurdyaeva 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.

5. Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Kurdyaeva 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. – Pp. 474–479.

6. Kurdyaeva 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.

7. 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.

8. Kurdyaeva 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.

9. Borchevkina O.P., Karpov M.I., Kurdyaeva 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.

10. 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.

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

12. 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.

13. 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 Международного Симпозиума «Атмосферная Радиация и Динамика» (МСАРД – 2019). — 2019. — С. 240.

14. 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.

Диссертация «Численное моделирование распространения атмосферных волн, обусловленных тропосферными источниками» Курдяевой Юлии Андреевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата



физико-математических наук по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы».

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Института физико-математических наук и информационных технологий БФУ им. И. Канта от 17 декабря 2019 года.

Присутствовали: 12 из 15 членов Научно-технического совета Института физико-математических наук и информационных технологий.

Результаты голосования: «за» – 12 чел., против – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 7/2019 от 17.12.2019 г.

Председатель Научно-технического совета  
Института физико-математических наук  
и информационных технологий  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
А.В. Юров



*И.о. председателя по НР* *Демин И.В.*