

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Курдяевой Юлии Андреевны «**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ОТ ТРОПОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 - «Физика атмосферы и гидросферы»

Диссертационная работа Ю.А. Курдяевой посвящена решению фундаментальной задачи физики атмосферы о распространении атмосферных волн, генерируемых возмущением поля давления на высотах тропосферы в верхнюю атмосферу. Актуальность изучения динамических процессов, в том числе волновых возмущений, обусловлена тем, что пространственные неоднородности различных масштабов, наблюдаемые в нейтральной атмосфере и ионосфере Земли, играют важную роль в функционировании современных технологических систем. Волновые возмущения необходимо учитывать при планировании запусков космических аппаратов. Атмосферные волны вызывают также возмущения ионосферной плазмы, которые оказывают существенное влияние на точность решения задач радиолокации и навигации. Кроме этого, волновые возмущения переносят энергию и импульс, передаваемые среде в верхней атмосфере при диссипации, вносят существенный вклад в формирование термического и динамического состояния.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, списков используемых сокращений, условных обозначений, рисунков и цитируемой литературы.

Введение посвящено обсуждению цели диссертационной работы, постановке задач, обосновывается актуальность, новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена вопросам и проблемам вычислительной гидродинамики и физики атмосферы. Представлены различные численные модели атмосферы, использующие разные численные схемы и методы решения уравнений. Курдяева Ю.А. достаточно хорошо разбирается в особенностях отдельных моделей, сделан вывод, что нельзя говорить о том какая модель лучше, какая хуже. Каждая модель создавалась для решения определенных задач, и сравнивать их просто нет смысла. Подробно описана численная модель атмосферы, используемая в данном диссертационном исследовании. Также рассмотрены различные метеорологические события как важный источник волновых возмущений во всей атмосфере, влияющий на динамические процессы в ней. Рассмотрены особенности вертикального распространения инфразвуковых и внутренних гравитационных волн генерируемых источниками, расположенными в нижней атмосфере. Обоснована мотивация поиска автором нового подхода к моделированию вертикального распространения волн от тропосферных источников в верхнюю атмосферу. Рассматриваемые в диссертации волны распространяются почти вертикально, поэтому рассмотрение ограниченной по горизонтали области вполне оправдано.

Вторая глава посвящена исследованию задачи о распространении волн от тропосферного теплового источника. Показано, что замена задачи о распространении волн от тропосферных источников на задачу о вертикальном распространении волн от вариаций давления у поверхности Земли физически обоснована. Математически обосновано использование в качестве нижнего граничного условия возмущений давления, что представляет собой новый подход к моделированию атмосферных волн, распространяющихся в верхнюю атмосферу, и является важным научным результатом. Строгое математическое исследование линейной задачи, выполненное в этой главе с использованием теории метрических пространств, показало, что решение граничной задачи о распространении волн от вариаций давления в приземном слое однозначно определяется переменным полем давления у поверхности Земли в бездиссипативном случае. Для диссипативной задачи требуется дополнительно задать условия на поле скоростей и температуры.

Полученный результат позволил сформулировать граничные условия для нелинейной диссипативной численной задачи и модернизировать уже существующую модель атмосферы высокого разрешения «AtmoSym», позволяющей рассчитывать распространение волн в области высот 0-500 километров. Результаты расчетов модели для инфразвуковых волн и внутренних гравитационных волн были протестированы на аналитических решениях и показали хорошее согласие. Это позволяет использовать модернизированную модель в реалистичных расчетах с использованием экспериментальных данных о вариациях давления, наблюдаемых у поверхности Земли.

В третьей главе рассматриваются особенности моделирования распространения волн от различных тропосферных источников с использованием экспериментальных данных, полученных в одной точке. Тропосферные источники часто имеют значительные масштабы, в то время как наблюдения вариаций давления у поверхности Земли могут проводиться в одной точке. Поэтому автором был предложен способ симметрично размножить имеющийся точечный источник и ввести случайный фазовый сдвиг для разрушения корреляции между дублирующими источниками. Результаты тестового расчета, полученные с использованием экспериментальных данных (инфразвуковая станция IS17, Кот-д'Ивуар) с использованием предложенного способа задания источника на значительной территории, показали картину, характерную для распространения волн в стратифицированной атмосфере, что свидетельствует о разумности предложенного подхода.

Более интересный результат в этой главе получен для двумерного исследования распространения волн из области прохождения солнечного терминатора и солнечного затмения. Было предложено не просто использовать данные о вариациях давления, а также данные, полученные косвенно через лидарное зондирование. Предполагается, что вариации интенсивности лидарного сигнала отражают частотные характеристики вариаций давления на фиксированной высоте. Полученные в ходе моделирования результаты позволили изучить волновые возмущения в атмосфере на всех высотах с высоким разрешением по времени и пространству.

Также в главе были рассмотрены тестовые численные расчеты с использованием ветрового профиля. Показано, что влияние ветра может быть существенным, однако, его реалистичное задание на всех атмосферных высотах является сложной задачей, которая

косвенно относится к задачам, поставленным в диссертационной работе, и требует отдельного исследования.

В четвертой главе рассмотрены результаты трехмерного моделирования вертикального распространения волн от атмосферного фронта в московском регионе с использованием экспериментальных данных, полученных на сети микробарографов. Дана оценка амплитуд типичных (среднестатистических) колебаний температуры в верхней атмосфере, обусловленных тропосферными процессами (4-5 К). Была впервые оценена температура волновых возмущений (около 100 К) в верхней атмосфере во время сильных метеорологических событий и показано, что основное влияние во время метеорологических событий на верхнюю атмосферу оказывает инфразвук. Также в главе рассмотрен вопрос влияния конечности расчетной области в региональной модели. Предложены нестандартные граничные условия на горизонтальных границах расчетной области, имитирующие уход волн за её пределы. Было показано, что вводимые горизонтальные границы расчетной области с течением времени могут существенно влиять на волновую картину, но существенно не влиять на амплитуду моделируемых волн в верхней атмосфере.

В заключении сформулированы результаты, полученные в работе.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты полностью опубликованы.

Достоинством диссертационной работы Курдяевой Ю.А. является то, что численное моделирование проводилось с учетом реальных наблюдений, но имеются и некоторые замечания. Существенных недостатков я не заметил, но вот в качестве замечания надо бы отметить то, что при расчетах после включения источника волн он существует постоянно, т.е. фактически мы в результате получаем установившееся решение. На самом деле в атмосфере не существует постоянно действующих источников (вариаций давления у поверхности) рассматриваемых волн. Реально наблюдаются некие всплески (цуги) возмущений, которые представляют собой пакет волн. Различные составляющие этого пакет распространяются с разной вертикальной групповой скоростью и достигают высот верхней атмосферы со сдвигом во времени, т.е. быстрые уже пришли и исчезли, а медленные только появились. Данное замечание следует рассматривать как пожелание для дальнейших исследований.

Есть также некоторые мелкие замечания по оформлению. Например, в подписи к Рис. 4.2 есть ссылка на Рис. 20 (явная опечатка); на Рис. 4.4. вариации давления приведены для 18 июля 2016 года, а спектры на Рис. 4.5 для 17 июля. Понятно, что это просто показательные результаты, но надо бы было для одного дня показать. Есть некоторые опечатки в формулах, но из-за их обилия это простительно.

Отмеченные недостатки, однако, не умаляют достоинств работы в целом и не снижают научную значимость полученных результатов.

