

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Зайцевой Дарьи Владимировны «Внутренние гравитационные волны в атмосферном пограничном слое и их влияние на приземные характеристики вертикального обмена», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Дарьи Владимировны Зайцевой посвящена экспериментальному исследованию внутренних гравитационных волн (ВГВ) типа волн Кельвина-Гельмгольца и волн плавучести, наблюдаемых в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (УАПС), и их влиянию на характеристики турбулентного обмена.

Целью диссертационной работы являлось получение количественных оценок степени влияния внутренних гравитационных волн на турбулентный обмен в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое. Для достижения этой цели в работе Д.В. Зайцевой предложена оригинальная методика, основанная на сопоставлении значений характеристик турбулентности (средних по волновому слою значений интенсивности эхо-сигнала, среднеквадратичного отклонения вертикальной компоненты скорости, а также приземных вертикальных потоков тепла и импульса) в присутствии и в отсутствие волновой активности в УАПС. Для регистрации волнообразных движений и идентификации двух рассматриваемых типов ВГВ использовались доплеровские акустические локаторы (содары), позволяющие визуализировать вертикальную структуру цугов волн, оценивать вертикальный профиль скорости ветра, определять высотное расположение волнового слоя, а также проводить измерения вертикальных распределений других характеристик атмосферного пограничного слоя (АПС). В настоящее время акустические содары, использующие обратное рассеяние звука слышимого диапазона на мелкомасштабных температурных неоднородностях являются одними из самых простых и экономически эффективных средств наземного дистанционного зондирования АПС, позволяющие при этом получать характеристики АПС с высоким вертикальным разрешением, не достижимым для многих других наземных методов исследования атмосферы. Развитые в диссертации Д.В. Зайцевой методы, использующие экспериментальные данные с акустических содаров, являются актуальными, новыми, соответствующими мировому уровню исследований в данной области. Тема диссертационного исследования важна как для понимания физики пограничного слоя, так и для совершенствования описания обменных процессов в численных моделях АПС.

Диссертация Д.В. Зайцевой состоит из введения, трех глав, первая из которых обзорная, а две других содержат оригинальный материал, выносимый на защиту, заключения с основными результатами, списка литературы и двух приложений. Список литературы состоит из 164 наименований. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, 39 рисунков, 6 таблиц.

Во Введении дано обоснование актуальности темы, обозначены цель и задачи работы, изложены основные методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов и личный вклад автора, а также перечислены публикации автора.

Первая глава является обзорной. Представлены литературные данные натурных измерений, указывающие на возможность реализации УАПС с различными параметрами и упомянуты проблемы моделирования УАПС. Автором сделана попытка дать общую характеристику теоретических представлений о причинах возникновения и характеристиках ВГВ в УАПС. Автором упомянуты теоретические и экспериментальные работы, указывающие на то, что прохождение волн может сопровождаться всплесками турбулентности.

Вторая глава посвящена описанию методики регистрации, а также представлению полученных статистических данных о волнообразных движениях. Приведены примеры совместных содарных и микробарографических измерений и проведен анализ возможных расхождений при регистрации волн различными методами. В качестве основного инструмента идентификации цугов волн использовался акустический содар. ВГВ разделялись на два класса — внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ) и волны плавучести (ВП) — на основе анализа их вертикальной структуры в поле эхо-сигнала содара. В главе представлены примеры регистрации волнообразных движений двух классов в нескольких регионах. Приведены статистические данные о частоте регистрации и параметрах волн в пригородной местности, собранные по данным непрерывных измерений в течение 8 лет.

Третья глава посвящена представлению результатов оценки влияния волновых цугов на турбулентные характеристики. Дано описание методики расчёта характеристик турбулентности внутри волнового слоя и вблизи земной поверхности. Приведён предлагаемый автором метод оценки влияния волн на интенсивность турбулентности, включающий в себя сравнение характеристик турбулентности во время прохождения цуга и в смежные промежутки времени. Представлены результаты анализа изменений структурной характеристики температуры и дисперсии вертикальной скорости внутри волнового слоя для 8 цугов волн, а также изменений кинетической энергии возмущений, и потоков тепла и импульса вблизи земной поверхности для 41 эпизода волновой активности. Проанализированы различия влияния на интенсивность турбулентности двух классов волн. Показано, что



полученные автором результаты сопоставимы с оценками других экспериментальных и модельных работ.

В Заключении подведены итоги работы и перечислены основные полученные результаты. Среди результатов диссертации следует особо выделить следующие. Предложены критерии идентификации ВГВ двух классов на основе анализа их вертикальной структуры, обнаруживаемой на содарных эхограммах. Обнаружены расхождения в регистрации волновых колебаний при помощи содара и микробарографа и предложено объяснение этим расхождениям. По данным содарных измерений в пригороде Москвы в 2008-2015 гг. собран каталог ВГВ разных классов и проанализированы частоты их повторяемости и параметры. Предложен метод оценки влияния волновых цугов на интенсивность турбулентности. Получены количественные оценки изменений структурной характеристики температуры и дисперсии вертикальной компоненты, измеренных внутри волнового слоя, а также количественные оценки изменений кинетической энергии и потоков тепла и импульса, сопутствующих прохождению цугов волн. В работе предложен оригинальный метод оценки влияния цугов волн на интенсивность турбулентности, включающий анализ микрометеорологических измерений как во время прохождения цуга, так и в смежные промежутки времени. Использование данных длительных непрерывных измерений позволило провести анализ большого количества эпизодов по единой методике для двух классов волн, выделение которых стало возможным благодаря использованию методов акустического зондирования. Согласно полученным результатам, прохождение волны плавучести может приводить к значительному увеличению значений структурной характеристики температуры, а также вертикальных потоков тепла и импульса. В то же время волны Кельвина–Гельмгольца оказывали незначительное влияние на эти характеристики турбулентности. Различие результатов, полученных для волн типа Кельвина–Гельмгольца и для волн плавучести, показывает, насколько важно идентифицировать тип волновых движений при исследованиях проблемы воздействия волн на турбулентность в УАПС.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые недостатки:

1. В работе представлены результаты обработки и анализа существенного объема экспериментальных данных, однако отсутствуют результаты моделирования или теоретических оценок, подтверждающие достоверность полученных результатов или дополняющие их. Сопоставление данных эксперимента с модельными или теоретическими результатами, полученными самим автором работы, придало бы большую завершенность проведенному исследованию.

2. Одним из основных результатов диссертации являются количественные оценки степени влияния внутренних гравитационных волн на турбулентный обмен, представленные, например, в Таблице 3.2. Имело смысл оценить и указать погрешности, с которыми были получены эти количественные значения.



3. Важным практическим результатом диссертационной работы является экспериментальная демонстрация возможности идентификации двух основных типов ВГВ в АПС – волн плавучести и внутренних гравитационно-сдвиговых волн типа валов Кельвина-Гельмгольца – на основе данных акустического зондирования при использовании разработанных в работе критериев. Однако явная формулировка этих критериев в виде отдельных положений не приводится, что затрудняет сопоставление предлагаемого подхода с результатами других авторов.

4. С точки зрения методических рекомендаций следует обратить внимание на неточности в использовании обозначений используемых величин (например, обозначения на рис. 3.12 и в выражении на стр. 73), а также применение терминов, которые не являются общепринятыми и не поясняются в тексте работы (например, «коэффициенты волнового воздействия» в Заключение).

Отмеченные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Д.В. Зайцевой. Результаты работы актуальны, представляют не только теоретическое, но и практическое значение и могут способствовать, в перспективе, усовершенствованию параметризаций потоков тепла и импульса в численных мезомасштабных прогностических моделях АПС. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию на этапе анализа рассматриваемой проблемы, при обработке экспериментальных данных и их интерпретации. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, представляются достоверными, обоснованными, обладают определенной степенью новизны. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах из перечня ВАК, апробированы на научных семинарах и конференциях высокого уровня. Автореферат работы и публикации Д.В. Зайцевой достаточно полно передают содержание и основные выводы работы.

Представленная диссертационная работа подтверждает высокий уровень научной квалификации автора, а также его глубокие знания актуальных задач физики атмосферы, проблем обработки и интерпретации данных содарных и микробарографических измерений; уверенно демонстрирует способности автора получать значимые научные результаты.


Диссертационная работа Д.В. Зайцевой «Внутренние гравитационные волны в атмосферном пограничном слое и их влияние на приземные характеристики вертикального обмена», соответствует требованиям пунктов 9-10 Положения о присуждении Ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Шуруп Андрей Сергеевич

кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика

доцент Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

«19» сентября 2022 г.



А.С. Шуруп

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, МГУ имени М.В. Ломоносова

Рабочий телефон: (495) 939 -3081

Электронный адрес: shurup@physics.msu.ru

Я, Шуруп Андрей Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«19» сентября 2022 г.



А.С. Шуруп

Подпись А.С. Шурупа удостоверяю

Колесова Н.С.

«19» сентября 2022 г.

