

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Зайцевой Дарьи Владимировны
«Внутренние гравитационные волны в атмосферном пограничном слое и их влияние
на приземные характеристики вертикального обмена»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

Внутренние гравитационные волны в атмосфере - важная и сложная часть ее динамики. Как параметры этих волн, так и характер их взаимодействия с движениями более крупных и более мелких масштабов варьируют в широких пределах. Хотя этот класс движений активно исследуется и целый ряд важных закономерностей их генезиса и эволюции установлен теоретически в течение второй половины XIX века, а в последнее время, с развитием соответствующих средств измерений, также и экспериментально, - обширная область волновых движений мезо- и микромасштабов остается малоизученной. При этом интерес научного сообщества ко всем аспектам волновой деятельности на этих масштабах не ослабевает, а скорее возрастает. Причинами этого являются все новые подтверждения влияния волновой деятельности на погодные процессы. Учет этих влияний в численных моделях атмосферы - например, путем параметризации - позволил бы получить более точный прогноз таких измеряемых характеристик погоды, как температура воздуха, количество и интенсивность осадков. Чтобы не быть голословной, приведу в качестве примера публикацию 2022 г. в февральском номере J. Atmos. Sci. (M. D. Cann et al.), в которой, по результатам радарных измерений с самолета и с земли, найдено, что развивающиеся на вершине облака неустойчивые волны Кельвина-Гельмгольца (так, казалось бы, хорошо изученные за последние 60-70 лет!), модифицируя условия роста ледяных частиц, оказывают сильное воздействие на интенсивность осадков у земли.

Многообразие свойств внутренних гравитационных волн, а особенно случайный характер их источников крайне затрудняют решение актуальной проблемы учета их динамики, в частности в численных моделях атмосферы. Поэтому поставленная в рассматриваемой диссертации и прямо связанная с указанной проблемой задача экспериментального изучения внутренних волн в пограничном слое и их влияния на турбулентный обмен, несомненно, является актуальной и имеет большое научное и практическое значение, а используемые методы исследования и характер анализируемых данных обеспечивают новизну результатов.

Перейдем к анализу текста диссертации, состоящей из Введения, трех глав, Заключения, двух приложений, списка литературы из 164 названий, общим объемом 134 с. с 9 рисунками и 6 таблицами.

Во Введении охарактеризованы актуальность темы исследования, цель работы, ее задачи, методы исследования, апробация работы, ее основные положения, выносимые на защиту, научная

новизна, достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертации, личный вклад автора. Эти вопросы изложены правильно и не вызывают возражений.

Глава 1 является обзорной. Справедливо отмечается, что, ввиду обширности проблемы внутренних волн в атмосфере, в рамках диссертации невозможно дать полный обзор состояния знаний в этой области. Все же автор стремится максимально охватить все основные классы волн, методы их регистрации, натурные эксперименты. Возможно, этим объясняется некоторая фрагментарность изложения.

Замечания к главе 1, кроме редакционных, о которых ниже, относятся главным образом к выводам. Они не вполне согласуются с текстом. Так, в выводах появляются "вихревые волны", которые в тексте главы не упоминаются. Было бы наиболее логично дать здесь четкое определение волн плавучести (ВП) и внутренних гравитационно-сдвиговых волн (ВГСВ), которые в дальнейшем являются основным предметом исследования. В тексте главы вразумительных определений также нет. Сказано, что ВП характеризуются зонами восходящих и нисходящих движений, расположенных вертикально, - этого недостаточно. Такое свойство есть у всех внутренних волн, описываемых линейной теорией.

В главе 2 описываются материалы регистрации волновых структур, аппаратура и места проведения измерений, методы и аппаратура регистрации. Приведен целый ряд примеров цугов волн на содарных эхограммах. Вид возмущений, отнесенных к классам ВГСВ и ВП, резко различен, так что отнесение записи к тому или иному классу на основании визуального просмотра, по-видимому, не представляет трудностей. В случаях ВГСВ зачастую наблюдается наклон гребней волн - обычно назад (в координатах эхограммы - время и высота), что характерно для волн конечной амплитуды с выраженными нелинейными эффектами.

Обширный объем обработанного экспериментального материала, полученного над разными географическими районами и над разными подстилающими поверхностями, существенно расширяет представления о многообразии волновой активности в различных условиях. Это, на мой взгляд, значительный успех работы.

Сделана попытка статистического анализа параметров волн и условий их существования (п. 2.4). На выборке около 1000 эпизодов, зарегистрированных в 2008-2015 гг. на Звенигородской научной станции, получены статистические данные о частоте появления, характере стратификации температуры и ветра, параметрах волн двух упомянутых выше классов (ВГСВ и ВП) над слабо неоднородной сельской местностью. Этот раздел представляет также большой научный интерес, его содержание требует дальнейшего изучения. Полагаю, что данный раздел заслуживал бы более тщательного анализа и в рамках диссертации. Так, например, указывается, что ВП наблюдаются в целом реже и в основном в теплый сезон (апрель-сентябрь). Этому интересному факту автор, к

сожалению, не дает какой-либо интерпретации. Далее, в табл. 2.2 и 2.3 (пределы и медианные значения параметров волн) не обнаруживается резких различий между ВГСВ и ВП, и это также не находит какого-либо объяснения. Медианные сдвиги ветра, например, равны 4 и 3 м/с на 100 м для ВГСВ и ВП соответственно. Получается, что волны обоих классов могут наблюдаться в практически одинаковых условиях. Но чем же объясняется их явно различный вид и причем тут плавучесть?

Глава 3 посвящена исследованию влияния внутренних гравитационных волн на вертикальный обмен в устойчивом пограничном слое. Достаточное внимание в этой главе уделено методам расчета характеристик турбулентности и вертикального обмена. В частности, описан используемый автором метод расчета MRD-спектров временного ряда. Для оценки влияния цугов волн на характеристики турбулентного обмена выделяются три участка на эхограмме, соответствующие состоянию воздушного потока до прохождения волн, во время этого прохождения и после него, и затем сравниваются рассчитанные характеристики турбулентности по трем участкам. Такой подход в неявном виде предполагает, что фазовая или групповая скорость направлена в ту же сторону, что и составляющая скорости потока в направлении распространения волн. При этом по величине она должна либо обгонять поток (в случае внешних мод), либо лежать внутри интервала изменений скорости потока в слое (моды, имеющие критический уровень). Это предположение надо бы как-то обосновать, - например, с привлечением опубликованных данных измерений фазовых скоростей. Не исключено, что большой разброс рассчитанных изменений характеристик турбулентности, полученных автором, объясняется отчасти тем, что принятое предположение не всегда справедливо.

В Заключение диссертации правильно и достаточно лаконично сформулированы полученные результаты. Сопоставляя их с заявленными во Введении задачами исследования и с выносимыми на защиту положениями, следует отметить, что поставленные задачи выполнены, а выносимые на защиту результаты получены и вполне обоснованы.

Список литературы из 164 названий показывает хорошее и разностороннее знакомство автора с экспериментальными и теоретическими работами по тематике ее диссертации. Хорошо представлены работы отечественных авторов, в том числе - опубликованные в зарубежных изданиях.

В диссертации имеются два приложения, имеющие, на наш взгляд, значительную ценность. Приложение 1 содержит таблицу параметров волновых цугов и сопутствующих условий стратификации температуры и ветра для более чем 40 эпизодов, зарегистрированных в 2008-2015 гг. В Приложении 2 даны таблицы рассчитанных характеристик турбулентности для тех же эпизодов.

Подводя итог, констатируем, что диссертация Д. В. Зайцевой представляет собой серьезное экспериментальное исследование внутренних гравитационных волн в устойчивом пограничном

слое атмосферы, характеризующееся несомненной новизной и актуальностью. Полученные результаты достоверны и убедительны.

Основные замечания к содержанию диссертации сделаны выше по ходу обсуждения текста. Редакционные замечания: в тексте недостает довольно многих запятых, имеются опечатки и стилистические погрешности, но в целом диссертация написана хорошим литературным языком. Основные результаты диссертации опубликованы.

Диссертационная работа Зайцевой Дарьи Владимировны соответствует паспорту специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы. Содержание диссертации, выдвинутые научные положения, сформулированные выводы и опубликованные работы дают основание заключить, что диссертация Зайцевой Дарьи Владимировны "Внутренние гравитационные волны в атмосферном пограничном слое и их влияние на приземные характеристики вертикального обмена" является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям пп.9 - 14 "Положения о присуждении ученых степеней" (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а ее автор Зайцева Дарья Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы.

Я, Шакина Наталья Павловна, д.ф-м.н., зав. ОАМ Гидрометцентра России, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и на последующую их обработку.

Доктор физико-математических наук,
Профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Зав. Отделом авиационной метеорологии
Гидрометцентра России

 Н. П. Шакина

Дата 16.09.2022

Подпись Шакиной Н. П. заверяю
Ученый секретарь Гидрометцентра России



 Н.А.Шестакова