

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук Кадыгрова Евгения Николаевича

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

Вазеевой Натальи Викторовны на тему:

**«Циркуляционные особенности атмосферного пограничного слоя по данным наблюдений и численного моделирования»,**

по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

Диссертационная работа Вазеевой Н.В. посвящена исследованию характеристик и свойств когерентных структур в АПС – упорядоченных спиралевидных вихрей разного масштаба с горизонтальной осью, – и термоконвективных структур с использованием результатов численного моделирования и данных натуральных экспериментов.

### **1. Актуальность темы диссертации**

Актуальность работы обусловлена значительным влиянием циркуляционных структур на характеристики турбулентного течения, на вертикальный профиль среднего течения, существенной ролью таких структур в процессах перемешивания, в процессах переноса влаги, тепла, импульса и других субстанций через атмосферный пограничный слой (АПС). По различным оценкам мезомасштабные валиковые структуры отвечают за 20-60% всего тепло-массопереноса через АПС. Вклад их в тепло-массоперенос и влияние на направление приповерхностного ветра достаточно велик, в то же время описание данных о пространственных масштабах, асимметрии, статистических и других характеристиках таких структур, параметризация этих явлений представляются в настоящее время недостаточно разработанными. Условия и механизмы генерации и поддержания вихревых структур меньшего масштаба, несмотря на давнюю регистрацию в численных моделях и достаточно уверенную и детальную экспериментальную регистрацию, остаются не до конца проясненными. Актуальность в исследовании конвективных движений изолированных объемов воздуха (термоконвективных структур) связана с большой сложностью и опасностью пилотирования самолетов внутри или вблизи области с четко выраженными границами изолированных конвективных потоков и возникающими вследствие этого явления стохастическими неоднородностями АПС. Интенсивность таких потоков определяет и условия полета планеров, и возможности их использования для непосредственного изучения поля скорости внутри термоконвективных структур. В процессе изучения атмосферной термической конвекции было создано большое число теоретических физико-математических моделей. Численное решение составленных в этих моделях уравнений термогидродинамики сложны для вычисления, а также для анализа и понимания результата и самого явления, точные аналитические решения находятся лишь в частных случаях. Поэтому применяемые в диссертационной работе статистические методы исследования данных натуральных измерений не потеряли своего значения. Адекватное описание данных о характеристиках циркуляционных структур, учет интенсифицирующего влияния когерентных структур в АПС на эмиссию и транспорт пыли, способствующего накоплению аэрозоля на верхних уровнях АПС и образованию аэрозольных слоев, необходимы для понимания процессов, протекающих в пограничном слое атмосферы, и, в перспективе, для совершенствования

моделей прогноза погоды и климатических изменений. Таким образом, актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

## 2. Содержание работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 167 страниц, включая 80 рисунков и 7 таблиц.

**Во введении** отмечена актуальность работы, степень разработанности темы исследования, цели исследования, а также весьма подробно изложены методология и методы исследования, проведен детальный обзор современного состояния решения проблемы развития в АПС различных когерентных структур, показана актуальность проводимых в этой области исследований отечественных и зарубежных ученых. Сформулированы научная и практическая ценность, научная новизна, личный вклад автора, приведены список школ и конференций, на которых состоялась апробация полученных результатов, список публикаций автора, краткое содержание работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации носит вводный характер. В её разделах дан краткий, но в то же время весьма глубокий и детальный обзор относящейся к задачам диссертации литературы, анализируется современное состояние исследования циркуляционных структур в АПС, обоснована актуальность выбранной темы. Автор при этом выказывает солидную эрудицию, подробно раскрывая детали каждого из отмеченных вопросов с конкретными ссылками на соответствующую научную литературу. В последнем разделе этой главы проводится постановка задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** работы приведено описание характеристик и свойств циркуляционных структур в АПС. Приведены основные уравнения квазидвумерной модели, дано описание численной реализации квазидвумерной модели и вычислительного алгоритма, приведены результаты моделирования. Рассмотрен нелинейный режим развития вторичных вихревых структур в АПС с использованием двухмасштабной модели, мезомасштабной атмосферной модели RAMS, WRF-ARW, данных по наблюдению структур в аридном регионе (Калмыкия, Черные Земли). Кроме того, проведено численное моделирование захвата частиц пыли горизонтально ориентированными вихревыми структурами в квазидвумерной модели и детальное исследование движения пылевых частиц с помощью модели WRF-Chem. Из результатов к данной главе можно выделить развитие асимметрии валиковой циркуляции, отмеченную интенсификацию процессов подъема и выноса субмикронного аэрозоля с подстилающих поверхностей аридных зон когерентными структурами с дальнейшим переносом и формированием аэрозольных слоев. При этом показано увеличение массового содержания субмикронных частиц в АПС при учете несальтационного механизма эмиссии пыли с подстилающей поверхности аридных зон Калмыкии при условии слабых ветров. Дополнительно исследована задача улучшения прогнозов характеристик метеорологических полей и турбулентности в нижней тропосфере и атмосферном пограничном слое (АПС) за счет усвоения в мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW оперативных данных современных дистанционных приборов: содаров и температурных микроволновых профиломеров, что позволяет уменьшить относительную ошибку прогноза скорости и температуры, в особенности для краткосрочных прогнозов.

**Темой третьей главы** является спиральность в АПС. Предложена и апробирована методика определения спиральности в АПС по данным акустического зондирования. Разработка такой методики является одной из важнейших частей научной новизны проведенной работы. Получен интересный с точки зрения глобального и регионального моделирования результат: в условиях отсутствия сильной конвекции обнаружена

корреляция хода интегральной спиральности с ходом половины квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования. При этом показана возможность использования спиральности в АПС в качестве полезного прогностического фактора для экстремальных явлений: блокирующего антициклона и полярных мезоциклонов (ПМЦ-крайне опасное метеорологическое явление, которое сопровождается ледяными дождями, штормовыми волнением и ветром, сильнейшими снежными зарядами).

**Четвертая глава** посвящена подробному изучению субмезомасштабных (стриков) и термоконвективных (термики) структур. Указанная глава придает общую законченность диссертационной работе. Предложена простая модель развития субмезомасштабных структур, позволяющая оценить их характерные масштабы в АПС; для верификации используются данные акустического зондирования с использованием содара высокого разрешения. Кроме того, разработан и апробирован алгоритм выделения конвективной структуры из данных акустического зондирования. Особый интерес вызывает полученная схожесть статистики характеристик термоконвективных структур с распределением Рэлея (двумерное распределение Максвелла). Этот результат может быть впоследствии использован для улучшения прогнозов характеристик метеорологических полей и турбулентности. Как и во всех остальных главах диссертации, в конце четвертой главы четко сформулированы важнейшие результаты, полученные в данной части выполненной работы.

**В Заключение** приведены основные выводы диссертационной работы.

**Список литературы** содержит ссылки на 172 публикации как отечественных, так и зарубежных ученых, охватывающий практически все аспекты диссертационной работы.

### **3. Новизна исследований и полученных результатов**

Научная новизна состоит в детальном исследовании характеристик когерентных структур, в частности, асимметрии полей продольной компоненты скорости и спиральности и ее непосредственные оценки, которые в настоящее время практически отсутствуют; учете процессов подъема и переноса аэрозолей в нелинейной нестационарной квазидвумерной модели АПС. Впервые проведен численный эксперимент на базе адаптированной с учетом несальтационной эмиссии при условии слабых ветров модели WRF-Chem; предложена и апробирована методика определения спиральности в АПС из данных акустического зондирования, как полусуммы квадратов компонент скорости ветра на верхних уровнях зондирования. Предложена простая модель развития субмезомасштабных структур (стриков); впервые собрана и проанализирована статистика термоконвективных образований на основе данных акустического зондирования в различных ветровых и температурных условиях в Калмыкии.

### **4. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Все положения представленной диссертационной работы обоснованы, достоверны и исключают двоякую интерпретацию.

### **5. Практическая значимость полученных результатов**

Результаты работы могут быть использованы при совершенствовании прогнозирования процессов опустынивания аридных территорий, исследовании процессов атмосферной турбулентности и их влияния на авиационную безопасность, исследовании и возможном прогнозировании таких опасных метеорологических явлений, как полярные мезоциклоны. Потенциальными потребителями результатов диссертационной работы являются

различные организации Российской Академии наук, Росгидромета, Министерства образования и науки РФ, Министерства по чрезвычайным ситуациям, других ведомств.

## **6. Оформление диссертации**

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

## **7. Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликованы 25 печатных работ, 4 из которых изданы в журналах, рекомендуемых ВАК, 1 статья в международном рецензируемом издании из списка, рекомендованного ВАК, находится в печати, 1 статья в международном рецензируемом издании из списка, рекомендованного ВАК, представлена к публикации, 19 – в тезисах докладов и сборниках трудов конференций. Опубликованные автором работы достаточно полно отражают материал, изложенный в диссертации. Результаты работы были представлены на целом ряде различных конференций.

## **8. Замечания по диссертации**

К работе можно высказать ряд замечаний:

### **1. К главе 2.**

- Исследования в квазидвумерной модели ограничены случаем нейтральной стратификации, в то время как безусловно представляет интерес случаи устойчивой и неустойчивой стратификации;
- детально исследован только один день из эксперимента 2007 года, хотя валиковая циркуляция наблюдалась и в другие дни;
- не приведено обоснование выбора параметризаций пограничного слоя в мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW;
- при численном моделировании транспорта аэрозоля не приведены средние вертикальные профили аэрозоля в разные моменты времени;
- усвоение данных в атмосферной модели WRF-ARW лучше проводить с использованием блока 4DVar усвоения, учитывающего историю процессов в АПС.

### **2. К главе 3.**

- Данные по спиральности, полученные из анализа экспериментов по акустическому зондированию, могли бы быть систематизированы в зависимости от, например, времени суток и метеорологических условий;
- при решении прогностических задач для экстремальных событий исследованы только полярные мезоциклоны 2013 г. и блокирующий антициклон 2010 г., хотя интерес представляют и другие случаи экстремальных событий, например, тропические ураганы.

### **3. К главе 4.**

- При исследовании развития оптимальных возмущений вблизи поверхности в экмановском слое стоило бы рассмотреть неустойчивую стратификацию;
- анализ статистических характеристик термоконвективных структур хотелось бы получить и для других случаев акустического зондирования атмосферного пограничного слоя, например, выполненных в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН в 2012, 2017 гг.

В качестве замечания ко всему тексту работы следует отметить:

1. присутствуют немногочисленные опечатки;
2. ряд рисунков включает слова на английском языке.

Приведённые выше замечания к диссертации ни в коей мере не умаляют её значимости и не снижают общего безусловно положительного впечатления о ней.

### **9.Оценка работы**

Представленная работа имеет внутреннее единство, хорошо оформлена, выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. Хотелось бы отметить добротное и качественное изложение всего текста в целом. Диссертационную работу отмечает ясность физических постановок, хорошая структурированность результатов, их детальный анализ и графическое представление. Совокупность изложенных в ней результатов следует оценивать как решение задачи, имеющей существенное значение для задач физики атмосферы и соответствующей п. 1 ("Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли") паспорта специальности 25.00.29 по номенклатуре ВАК РФ.

### **Заключение**

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 25.00.29 — "физика атмосферы и гидросферы", а также критериям пункта 9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней", предъявляемых Высшей аттестационной комиссией РФ к кандидатским диссертациям. Соответственно соискатель — Вазаева Наталья Викторовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 -"физика атмосферы и гидросферы".

Официальный оппонент

Кадыгров Евгений Николаевич,  
 доктор технических наук, доцент,  
 кандидат физико-математических наук  
 главный научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
 Адрес места работы: 141700 Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3.

Рабочий телефон 8-495-5799455

E-mail: [enkadygrov@gmail.com](mailto:enkadygrov@gmail.com),

[ldz@cao-rhms.ru](mailto:ldz@cao-rhms.ru)

Я, Кадыгров Евгений Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

21 ноября 2018 г



/Е.Н. Кадыгров/

Подпись Е.Н. Кадыгрова заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «ЦАО»

Кандидат географических наук




/ Безрукова Н.А./