

На правах рукописи



Вазаева Наталья Викторовна

**ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.29 —
«Физика атмосферы и гидросферы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Чхетиани Отто Гурамович

Официальные оппоненты: **Крупчатников Владимир Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом численных прогнозов погоды и загрязнения атмосферы Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института (Новосибирск)

Кадыгров Евгений Николаевич,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Российской академии наук» (ТОИ ДВО им. В.И.Ильичева РАН), г. Владивосток.

Защита состоится 27 декабря 2018 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 при Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д.3, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.096.01.

Автореферат разослан «__» ноября 2018 года.
Телефон для справок: +7 (495) 951 55 65.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.01,
канд. геогр. наук

Краснокутская Людмила Дмитриевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия особое внимание привлекают проблемы развития в атмосферном пограничном слое (АПС) различных когерентных циркуляционных структур, образованных вследствие гидродинамических неустойчивостей, в частности, широко распространенных упорядоченных спиралевидных вихрей с горизонтальной осью, направленной примерно вдоль среднего направления геострофического ветра [Гранберг И.Г. и др., 2009]. Такие вихри образуются уже при достаточно слабом ветре 2-3,5 м/с [Михайлова Л. А. и Орданович А. Е., 1991], когда происходит перестройка трехмерных конвективных ячеек в продольно ориентированные с горизонтальным масштабом 3-5 км, и характерны для пограничного слоя развитого тропического урагана и для высоких широт, когда в результате вторжений холодного воздуха над более теплой водной поверхностью возникают условия для развития конвекции, которая в сочетании с ветром формирует устойчивую систему вытянутых горизонтальных валов [Foster R.C., 2013].

Наряду с организованными крупномасштабными структурами, в пограничном слое постоянно существуют вихревые структуры меньшего, как пространственного – от десятков до сотен метров, так и временного масштабов – десятки секунд – минуты, ориентированные примерно на 30 градусов относительно направления геострофического ветра [Drobinski P. et al., 2007]. Несмотря на давнюю регистрацию в численных моделях [Deardorff J.W., 1972] и достаточно уверенную и детальную экспериментальную регистрацию [Drobinski P. et al., 2004], условия и механизмы генерации и поддержания таких структур остаются не до конца проясненными.

Изучению термиков (термоконвективных структур) – конвективных движений изолированных объемов воздуха – называемых в иностранной литературе также пузырями, в настоящее время уделяется большое внимание. Значительный интерес представляет изучение процессов образования кучевых облаков вследствие мощной атмосферной конвекции [Hernandez-Deckers D. and Sherwood S.C., 2016]. 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 статистические методы исследования данных натуральных измерений не потеряли своего значения, и продолжают активно развиваться [Petenko I.V. and Bezverkhni V.A., 1999, Вульфсон А.Н. и Бородин О.О., 2016].

Спиралевидные вихри значительно влияют на характеристики турбулентного течения, определяют вертикальный профиль среднего течения, играют существенную роль в процессах перемешивания, в процессах переноса влаги, тепла, импульса и других субстанций через АПС. По оценкам, сделанным в [Chou S.H. and Ferguson M.P., 1991], валиковые структуры отвечают за 20-60 % всего тепло-массопереноса через АПС. Вклад их в тепло-массоперенос и влияние на направление приповерхностного ветра достаточно велик [Foster R.C. and Levy G., 1998], в то же время параметризация этих явлений представляется в настоящее время недостаточно разработанной.

В присутствии таких структур в конвективном пограничном слое весьма заметным оказывается общее количество поднимаемой пыли [Gorchakov G. I. et al., 2003, Klose M. and Shao Y., 2012]. Когда скорость ветра превышает 5 м/с, тонкодисперсный аэрозоль легко переходит в атмосферу, поднимается на значительную высоту и может длительное время находиться в воздухе.

Процессы выноса, распределения и переноса аэрозоля, в особенности на аридных и семиаридных областях юга Европейской территории России, в большой степени определяют состав атмосферы и региональную изменчивость климата. Атмосферный пылевой аэрозоль оказывает значительное влияние на региональный и глобальный климат [Кондратьев К.Я. и Ивлев Л.С., 2008].

Адекватное описание данных о пространственных масштабах, асимметрии, статистических и других характеристиках циркуляционных структур – в частности, мезомасштабных, субмезомасштабных валиковых циркуляциях и термоконвективных структур в дневное время в нижней части АПС; теоретическое исследование и численное моделирование этих структур в АПС; развитие численных моделей, учитывающих процессы выноса аэрозольных частиц с подстилающей поверхности и их интенсивного

переноса на дальние расстояния при участии валиковой циркуляции; формирование аэрозольных слоев в верхней части АПС; а также учет этих структур, процессов и факторов в моделях пограничного слоя, представляются весьма актуальными и необходимы для понимания процессов протекающих в пограничном слое атмосферы, и, в перспективе, совершенствования их параметризации и учета в моделях прогноза погоды и климатических изменений.

Целью данной работы является исследование 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 натурных экспериментов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. исследование нелинейных режимов формирования упорядоченных структур в экмановском слое;
2. получение пространственных характеристик когерентных структур и их ориентации в температурно-стратифицированном турбулентном пограничном слое на базе квазидвумерной модели и негидростатической мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW и вихреразрешающей модели WRF-LES;
3. анализ развития асимметрии полученных в моделях мезомасштабных когерентных структур, их продольного поля скорости и поля спиральности;
4. исследование процессов подъема и выноса частиц пыли такими мезомасштабными структурами в рамках нестационарной нелинейной квазидвумерной модели АПС;
5. воспроизведение синоптической ситуации в районе натурных измерений в рамках мезомасштабной атмосферной модели WRF-Chem;
6. оценка роли спиральности при описании циркуляционных процессов в АПС;
7. оценка параметров и статистических характеристик температурных и вихревых структур различного пространственного и временного масштаба по данным экспериментов акустического зондирования в Калмыкии и Цимлянске, в 2007-2017 гг.;

8. исследование влияния усвоения данных атмосферных экспериментов на достоверность результатов численного моделирования.

Методология и методы исследования.

Квазидвумерные численные модели мезомасштабных процессов являются полезной основой для гидродинамических исследований при разработке нелинейных теорий, в аналитических исследованиях, анализе устойчивости полученных решений. Такие модели стабильно демонстрируют появление продольных вихрей и позволяют непосредственно сфокусироваться на изучении параметров когерентных структур, в том числе их асимметрии, без учета влияния ошибок и неоднозначностей при выборе различных параметризаций, погрешностей подсеточного моделирования, возникновения других типов когерентных структур (например, стриков – субмезомасштабных вихревых структур).

Для численного разрешения короткоживущих мелкомасштабных, расположенных близко к земле стриков, упоминаемых, например, в [Drobinski P. et al., 2007] предполагается использовать LES моделирование, где возникновение стриков происходит довольно часто.

В [Gorchakov G.I. et al., 2003, Klose M. and Shao Y., 2012] показано, что мезомасштабная циркуляция может вызывать локальное превышение пороговой скорости ветра, и, как следствие, запускать локально механизм сальтации пыли [Bagnold R.A., 1941] и последующий ее транспорт на большие расстояния. Очевидно, что термоконвективные структуры, описанные, например, в [Petenko I.V. and Bezverkhniĭ V. A., 1999], также захватывают частицы пыли с подстилающей поверхности и переносят аэрозоли в верхнюю часть АПС. Таким образом наличие когерентных структур в АПС интенсифицирует эмиссию и транспорт пыли, способствует накоплению аэрозоля на верхних уровнях АПС.

Для численного моделирования синоптической ситуации была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF – Weather Research and Forecasting [Skamarock W.C. et al., 2008]. В частности, модель WRF-LES и WRF-Chem для воспроизведения вихревой циркуляции с хорошим разрешением и ее влияния на подъем и перенос на дальние расстояния аридного аэрозоля в верхних слоях АПС с учетом мезомасштабной вихревой циркуляции. В настоящее время открытая

модель WRF является одной из наиболее универсальных и отлаженных открытых систем моделирования атмосферы. Она успешно и широко используется для метеорологического прогнозирования и исследовательских целей в научных организациях и метеослужбах многих стран и продолжает непрерывно развиваться.

Научная новизна:

1. Проведено исследование характеристик когерентных структур, в частности, асимметрии полей продольной компоненты скорости и спиральности и ее непосредственные оценки, которые в настоящее время практически отсутствуют.

2. Впервые учтены процессы подъема и переноса аэрозолей в нелинейной нестационарной квазидвумерной модели АПС.

3. Исследуется влияние упорядоченных циркуляционных структур на вынос субмикронного аэрозоля в аридных условиях в рамках модели WRF Chem. Отмечается интенсификация процессов подъема и переноса с формированием аэрозольных слоев.

4. Впервые проведен численный эксперимент на базе адаптированной с учетом несальтационной эмиссии при условии слабых ветров модели WRF-Chem. Уточнены механизмы подъема пыли на основе данных натурных измерений в Калмыкии, в июле 2007 г.

5. Предложена и апробирована методика определения спиральности в АПС из данных акустического зондирования. Проведен анализ результатов экспериментов по акустическому зондированию атмосферного пограничного слоя, выполненных в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН в аридно-степных зонах юга России в Черноземельском районе республики Калмыкия (с 21 июля по 1 августа 2007 г.), на базе Цимлянкой научной станции (со 2 по 26 августа 2012 г.) и на Шпицбергене (с 3 по 13 мая 2009 г.). Изучено пространственное распределение спиральности, получены ее количественные характеристики и временной ход на основе экспериментальных данных, проведено сравнение с теоретическими оценками и расчетами по мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW.

6. Предложена простая модель развития субмезомасштабных структур (стриков).

7. Впервые собрана статистика термоконвективных образований на основе данных акустического зондирования в различных ветровых и температурных условиях в Калмыкии в 2007, 2016 гг. Исследованы распределения длительности превышения вертикальной скоростью предельного (порогового) значения скорости, максимального значения скорости в пределах этого промежутка времени, общего горизонтального пространственного масштаба.

Практическая значимость. Разработанная квазидвумерная модель пограничного слоя, разрешающая когерентные структуры разного масштаба с разными пространственными характеристиками и углами ориентации, может быть доведена до уровня вихререзающей LES модели с подсеточной схемой параметризации, учитывающей спиральность, и использована для оптимизации мезомасштабных атмосферных расчетов.

Учет интенсифицирующего влияния когерентных структур на процессы выноса и транспорта аэрозоля через верхние слои АПС в мезомасштабных атмосферных моделях позволит увеличить точность описания АПС, улучшить понимание роли организованных вихревых структур в процессах теплопереноса в АПС.

В условиях отсутствия сильной конвекции была обнаружена хорошая корреляция хода интегральной спиральности с ходом половины квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования (400-600 м). Предложенная методика определения спиральности позволит упростить процедуру построения глобального и регионального поля спиральности, в частности, при решении прогностических задач.

Практическая ценность в исследовании 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.

Кроме того, для авиации актуальна задача исследования возможностей улучшения прогнозов характеристик метеорологических полей и турбулентности в нижней тропосфере и

атмосферном пограничном слое (АПС) за счет своевременного и надежного учета оперативных данных о турбулентности, вертикальных и горизонтальных ветровых сдвигах, боковом и продольном ветре в АПС. Проблема численного восстановления, пространственного и временного прогнозирования ветра и ветровых сдвигов (и других метеорологических характеристик) в приземном и пограничном слоях атмосферы на «не освещенной» в метеорологическом отношении территории в условиях минимума исходной метеорологической информации еще далека от своего решения. Использование уточненной модели WRF-ARW с усвоением данных о вертикальных профилях температуры и ветра для прогноза ветровых сдвигов и порывов ветра на высотах, превышающих 150-200 метров позволяет уменьшения относительной ошибки прогноза скорости и температуры, в особенности для краткосрочных прогнозов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано развитие асимметрии валиковой циркуляции, характеризующееся заметным увеличением экстремальных значений амплитуд продольных компонент скорости и спиральности.

2. Показана способность циркуляционных структур долгое время удерживать мелкодисперсные частицы пыли и переносить их на большие расстояния.

3. Отмечена интенсификация процессов подъема и выноса субмикронного аэрозоля с подстилающих поверхностей аридных зон когерентными структурами с дальнейшим переносом и формированием аэрозольных слоев по результатам численного моделирования в WRF-Chem.

4. Показано увеличение массового содержания субмикронных частиц в АПС при учете несальтационного механизма эмиссии пыли с подстилающей поверхности аридных зон Калмыкии при условии слабых ветров.

5. Предложена и апробирована методика определения спиральности в АПС по данным акустического зондирования. В условиях отсутствия сильной конвекции обнаружена корреляция хода интегральной спиральности с ходом половины квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования.

6. Для плотности спиральности крупномасштабных движений получены средние значения 0,3-0,6 м/с², средняя же по

слою спиральность в атмосферном пограничном слое оказалась близка к теоретическим и эмпирическим значениям турбулентной спиральности и составляет 0,02-0,12 м/с². Значения спиральности валиковой циркуляции, посчитанные по результатам моделирования в модели WRF-ARW, оказываются близкими к данным оценкам.

7. Предложена простая модель развития субмезомасштабных структур (стриков), позволяющая оценить их характерные масштабы в АПС. Близкие к ним значения получены по данным акустического зондирования содаром высокого разрешения.

8. Показана возможность использования спиральности в АПС в качестве прогностического фактора для экстремальных явлений: блокирующего антициклона и полярных мезоциклонов.

9. Показана близость статистики характеристик термоконвективных структур (по данным акустического зондирования) к распределению Рэлея (двумерному распределению Максвелла).

Личный вклад. Автор принимал активное участие в постановке и решении всех задач диссертационной работы. Автором проводилась обработка, анализ результатов натуральных экспериментов. Участие в проведении экспериментов. Участие в постановке задач численного моделирования. Создание и адаптация конфигураций выбранной модели для каждого численного эксперимента и проведение численных экспериментов. Анализ результатов моделирования и участие в анализе теоретических результатов. Обеспечение подготовки полученных результатов к опубликованию в ведущих российских и зарубежных журналах, а также их представление на международных конференциях и семинарах

Достоверность. Обеспечивается согласованностью результатов проведенных численных экспериментов со спутниковыми данными, результатами реанализа и натуральных измерений; использованием в качестве начальных и граничных условий модели WRF данных современных реанализов атмосферы высокого разрешения, прошедших всестороннее тестирование; большим объемом наблюдательных данных и согласием полученных результатов с существующими представлениями и результатами других авторов.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы были представлены на семинаре

Лаборатории геофизической гидродинамики, Отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН, а также на 16 международных конференциях и симпозиумах: EGU General Assembly Conference Abstracts. – April 2015; EGU General Assembly Conference Abstracts. – April 2018; XIX Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 2015 г.; Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XIV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 2015 г.; Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. 18-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых. Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 2014 г.; 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Туапсе, 2015 г.; Advanced of Boundary-Layer Remote Sensing ("ISARS'2016"), Болгария, г. Варна, 2016 г.; Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики». Апатиты, 2016 г.; XVII научная школа "Нелинейные волны - 2016". Нижний Новгород, 2016 г.; Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 2017 г.; The 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Science Conference & The 7th PEEX Meeting, Москва, 2017 г.; Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуковские чтения по тематике: «Естественные и антропогенные аэрозоли. Современное состояние и перспективы развития процессов фильтрации. Разработка и модернизация технологии электроформования нано- и микроволокнистых материалов. Методы исследования и анализа аэрозолей». Москва, 2017 г.; International Conference “Vortices and coherent structures: from ocean to microfluids”, Владивосток, 2017 г.; International Workshop on complex turbulent flows, Tangier - Morocco, 2017; 14th European Polar Low Working Group (EPLWG) meeting, Workshop on 'Polar lows and mesoscale weather extremes', Trier, Germany, 2018; Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», Москва, 2018 г.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 25 печатных работах, 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.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается методология и методы, научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, описывается личный вклад автора, апробация и публикации по теме диссертационной работы, кратко дано описание структуры диссертации.

В **первой главе** представлен обзор публикаций, близких к теме диссертации. Анализируется современное состояние исследования циркуляционных структур в атмосферном пограничном слое. На основании обзора обоснована актуальность выбранной темы, проведена постановка задачи диссертационной работы. Показано, что изучение циркуляционных особенностей АПС предполагает анализ когерентных и термоконвективных структур различного масштаба, их пространственных, статистических характеристик, а также их влияния на процессы подъема и выноса пыли. Полезной физической/гидродинамической функцией для описания таких структур является спиральность. Инструментами для изучения являются различные численные модели: квазидвумерная, негидростатические модели WRF-ARW, RAMS; верификация результатов и построение методик обработки данных осуществляется на базе натурных измерений в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Вторая глава посвящена описанию характеристик и свойств циркуляционных структур в атмосферном пограничном слое. Рассмотрен нелинейный режим развития вторичных вихревых структур в АПС с использованием двухмасштабной модели атмосферного пограничного слоя, мезомасштабной атмосферной

модели RAMS, данных по наблюдению структур в Калмыкии. В двухмасштабной модели поле скорости разбивается на крупномасштабный, зависящий только от вертикальной координаты профиль горизонтальной скорости ветра и трехмерное поле скорости, связанное с валиковой циркуляцией, зависящее от вертикальной координаты и координаты в направлении перпендикулярном ориентации валиков. Влияние турбулентности параметризуется турбулентной вязкостью. Учитывается модификация профиля ветра валиками. В зависимости от числа Рейнольдса реализуются различные типы гидродинамической неустойчивости, характерные для АПС. Это проявляется во взаимной ориентации возникающих периодических по горизонтальной координате валиков и геострофического ветра, а также в масштабах и пространственных периодах структур. Числа Рейнольдса меняются в диапазоне 100-400. При значениях числа Рейнольдса $Re \approx 150$ происходит переход от одного типа неустойчивости к другому, из-за чего резко меняется знак и величина угла ориентации валиков, от $\varepsilon \approx -15^\circ$ до $\varepsilon \approx 10^\circ \div 15^\circ$. С ростом числа Re увеличиваются средняя энергия и спиральность. При $Re=200-300$ зависимость близка к линейной, что указывает на возможность использования здесь слабо-нелинейных подходов, в которых амплитуды возмущений скорости растут как $Re^{1/2}$. Исследованы пространственные распределения компонент скоростей, завихренности, спиральности. Параметры, характеризующие квазипараллельные валиковые структуры, вычислялись до момента установления стационарного режима при различных значениях Re и углов ориентации валов. Отмечено развитие асимметрии продольной компоненты скорости, положительных и отрицательных значений спиральности валиковых структур (по и против направления геострофического ветра) с ростом Re с увеличением экстремальных значений амплитуды отрицательной продольной компоненты скорости (против направления геострофического ветра) по сравнению с положительной амплитудой (по направлению ветра) (рис. 1-2).

Амплитуды положительной составляющей спиральности также превышают амплитуды отрицательной составляющей спиральности. Наблюдаемое развитие асимметрии имеет, по всей видимости, схожие черты с хорошо известным в лаборатории и геофизических системах явлением циклон-антициклонной

асимметрии, при котором в системах с вращением более интенсивными и долгоживущими оказываются образования с антициклоническим вращением.

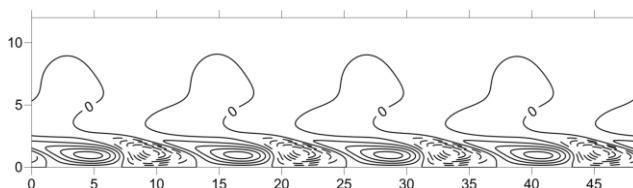


Рис. 1. Пространственное распределение продольной компоненты скорости U по осям Y, Z . $Re=175$, $\varepsilon \approx 15^\circ$, интервал между контурами равен 0,02. Отрицательные значения показаны пунктирной линией

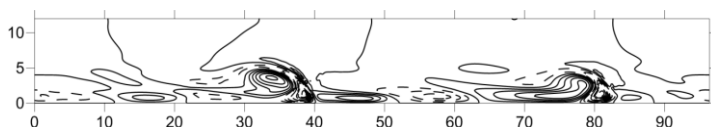


Рис. 2. Пространственное распределение продольной компоненты скорости U по осям Y, Z . $Re=300$, $\varepsilon \approx 10^\circ$, интервал между контурами равен 0,05. Отрицательные значения показаны пунктирной линией

Качественное сравнение оценки величины асимметрии по результатам двухмасштабного моделирования и по данным когерентных структур, измеренных методами акустического зондирования в АПС в Калмыкии, в июле 2007 года, показало схожее распределение. Получено неплохое соответствие результатов численного моделирования рассматриваемого случая в рамках мезомасштабной атмосферной модели RAMS наблюдаемым пространственным распределениям циркуляционных движений, центры которых расположены примерно на высотах 1200-1300 м. Наблюдаемая картина валиковой циркуляции начинает воспроизводиться в мезомасштабной атмосферной модели RAMS при горизонтальном шаге сетки 500 м. Значения эффективного числа Рейнольдса и профиль коэффициента турбулентной вязкости, полученный в представлении вихревой вязкости, характерны для условий неустойчивой стратификации.

Проводится исследование развивающейся мезомасштабной валиковой циркуляции и ее транспортных свойств в атмосферном пограничном слое (АПС). С использованием модели WRF-ARW детально рассмотрен характерный эпизод 28 июля 2007 г. в Калмыкии, охваченный наблюдениями экспедиции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Особенности циркуляции неплохо воспроизводятся при расчетах с горизонтальным разрешением 540-180 м. Отмечается наличие асимметрии компонент скорости ветра и компонент спиральности, полученное ранее для квазидвумерной модели. Для синоптической ситуации в Калмыкии в июле 2007 года асимметрия достигает значений примерно от 0,784 м/с до 3,471 м/с для горизонтальной скорости и от 0,0206 м/с² до 0,0333 м/с² для спиральности по широтному и долготному разрезам.

Моделирование захвата частиц пыли горизонтально ориентированными вихревыми структурами в квазидвумерной модели указывает на возможность захвата и длительного удержания частиц в окрестности максимальной концентрации завихренности. Долгоживущие вихревые циркуляционные системы в АПС оказываются не менее интенсивным источником транспорта примесей, чем интенсивные вихри с вертикальной осью. Частицы могут переноситься на большие расстояния - чем мельче частица, тем больше расстояние. Например, частицы с медианным размером 6 мкм начинают заметно оседать после 10-километрового «путешествия» в свободной атмосфере. Другие продолжают двигаться внутри вихрей, что приводит к образованию аэрозольных слоев. Реальный характер движения частиц в атмосферном потоке более сложный из-за влияния частиц на турбулентные пульсации. Этот момент учитывается в модели WRF-Chem, что позволяет получить лучшее представление о характере подъема и переноса аэрозоля с подстилающей поверхности.

С помощью модели WRF-Chem детально исследовалось движение пылевых частиц в естественных условиях. Было получено подтверждение результатов о возможности захвата пылевых частиц организованными вихревыми структурами, продемонстрированное для простых моделей. Валики способны поднять пыль выше АПС, благодаря восходящим потокам воздуха. Эмиссия аэрозоля происходит преимущественно под валами, наличие которых существенно интенсифицировало подъем пыли, в том числе, по высоте подъема. Направление дальнейшего переноса пыли в

значительной степени определяется углом отклонения роллов от геострофического ветра и достигает нескольких км, что видно по сдвигу пылевого облака (см. рис. 3). Валиковая циркуляция способна удерживать мелкодисперсный аэрозоль и образовывать взвешенные облака пыли – аэрозольные слои – протяженностью в несколько км. Подобные слои наблюдались, в частности, с борта самолета при лидарном зондировании [Golitsyn G. S. et al., 2003].

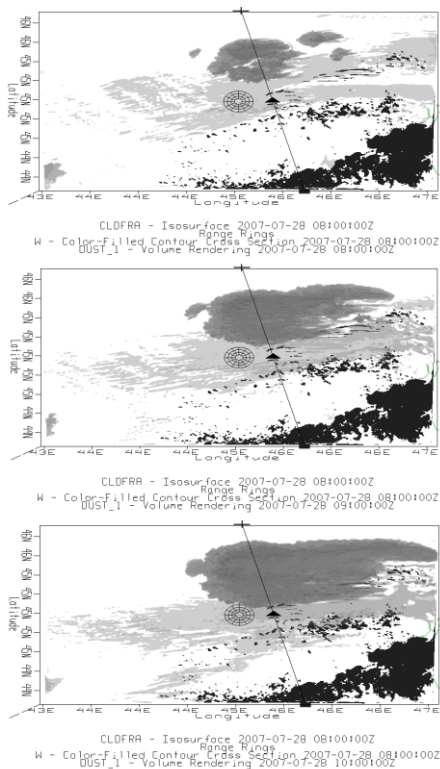


Рис. 3. Доля облачности (черным цветом) – для 8 UTC; и массовое содержание минерального аэрозоля (в оттенках серого) – сверху вниз для 8UTC, 9UTC, 10UTC; над районом измерений, вид сверху.

Концентрические окружности обозначают расположение точки наблюдений. Черная линия со стрелкой показывает направление, примерно перпендикулярное оси роллов. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г. Шаг сетки 540 м

Для учета несальтационной эмиссии аэрозоля при условии слабых ветров (до 4 м/с) выполнен анализ результатов многолетних комплексных наблюдений суточных вариаций массовой и счетной концентрации аэрозольных частиц размером 0,1-15 мкм на двух уровнях 0,5 и 1,5 или 2,0 м, их дисперсного и элементного состава, метеорологических условий в приземном слое атмосферы опустыненных участков степных зон Калмыкии [Chkhetiani O. G. et

al., 2012]. Дополнительно проведена корректировка температуры поверхности модели WRF-Chem по сравнению с данными натуральных наблюдений. Отмечено занижение реальных данных в модели примерно на 7°. Итоговое массовое содержание мелких частиц (с медианным размером до 5 мкм) изменяется с 0,495 мкг/кг до 1,4 мкг/кг сухого воздуха (8UTC).

Исследована задача улучшения прогнозов характеристик метеорологических полей и турбулентности в нижней тропосфере и атмосферном пограничном слое (АПС) за счет своевременного и надежного учета оперативных данных о турбулентности, вертикальных и горизонтальных ветровых сдвигах, боковом и продольном ветре в АПС. Модель с усвоением данных содаров и температурного профилимера позволяет достичь уменьшения относительной ошибки прогноза скорости и температуры, в особенности для краткосрочных прогнозов. Для дальнейших исследований рекомендуется применять 4DVar усвоение, учитывающее историю процессов в АПС.

В третья глава исследуется спиральность в АПС. Спиральностью гидродинамического поля скорости называется скалярное произведение скорости на завихренность – $\mathbf{v} \cdot \nabla \times \mathbf{v}$. Спиральность отражает нарушение зеркальной симметрии и, очевидно, характерна для движений, происходящих на фоне глобального вращения. Суперспиральность крупномасштабного (экмановского) течения, $S_H = \overline{\mathbf{W}} \cdot \nabla \times \overline{\mathbf{W}}$, (компоненты ротора средней скорости $\overline{\mathbf{W}} = [\nabla \times \overline{\mathbf{V}}]$), введённая впервые Хайдом [Hide R., 1989], играет важную роль в процессах эволюции спиральности.

Сделано заключение, что турбулентная спиральность возникает вследствие вертикальной неоднородности каскадным образом и обусловлена наличием спиральности в крупномасштабных движениях. Найдено значение суперспиральности для эпизода наблюдений в Цимлянске, 8 августа 2012 г., и объяснено отрицательное значение спиральности в данный период наблюдений.

Проведен анализ результатов акустического зондирования атмосферного пограничного слоя, выполненных в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН в аридно-степных зонах юга России в Черноземельском районе республики Калмыкия (2007 г.), на базе Цимлянской научной станции (2012 г.) и на Шпицбергене (2009 г.).

Спиральность в данном случае определяется только горизонтальными компонентами завихренности и имеет вид [Курганский М.В., 1989, Hide R., 1989]: $H(z) = -U(z)\frac{\partial V}{\partial z} + V(z)\frac{\partial U}{\partial z}$.

Интегральная спиральность H_{int} в точности равна одной второй квадрата скорости геострофического ветра [Курганский М.В., 1989]: $H_{int} = \int_0^\infty H(z)dz = \frac{1}{2}(U_G^2 + V_G^2)$.

Получены значения спиральности крупномасштабных движений, лежащих в диапазоне абсолютных значений 0,3-0,6 м/с², и средней по слою спиральности в атмосферном пограничном слое – 0,02-0,12 м/с² (близки к теоретическим оценкам турбулентной спиральности). На основе полученных данных, по градиентам скорости и известным значениям турбулентных напряжений Рейнольдса возможно провести оценку коэффициентов полуэмпирической модели турбулентности, с параметризацией турбулентной спиральности [Пономарев В.М., Чхетиани О.Г., 2005]. Прослеживается хорошая связь хода средней по слою спиральности и кинетической энергии в дневные часы. В условиях отсутствия сильной конвекции обнаружена хорошая корреляция хода интегральной спиральности с ходом квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования (400-600 м), правомерно при данных условиях заменяющего в нашем исследовании ход квадрата скорости геострофического ветра. Это позволяет упростить процедуру построения глобального и регионального поля спиральности, в частности, при решении прогностических задач. Коэффициенты корреляции для Калмыкии и Цимлянска рассчитаны для каждого случая и близки к единице. На рис. 4 показаны результаты для 29, 30 и 31 июля 2007 года, Калмыкия: $r_{29\ 10:00-20:00} = 0,87$; $r_{30\ 10:00-15:00} = 0,74$; $r_{31\ 09:00-15:00} = 0,85$; для 9 августа 2012 года, Цимлянск: $r_{9\ 00:00-02:00} = 0,91$; $r_{9\ 09:00-16:00} = 0,93$. Эмпирические значения интегральной спиральности верифицировались при помощи открытой исследовательской негидростатической мезомасштабной атмосферной модели WRF с использованием усвоения данных акустического зондирования.

Показана возможность практического применения спиральности как полезной дополнительной физической/гидродинамической характеристики атмосферных движений для экстремальных явлений: блокирующего антициклона

и полярных мезоциклонов; ее прогностический/диагностический смысл.

Проводится вычисление интегральных характеристик полярных мезоциклонов (ПМЦ) и блокирующего антициклона, в частности геопотенциала, энергии и спиральности, с использованием данных ре-анализа (ECMWF), результатов численного моделирования в мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW, их сравнение с экспериментальными данными.

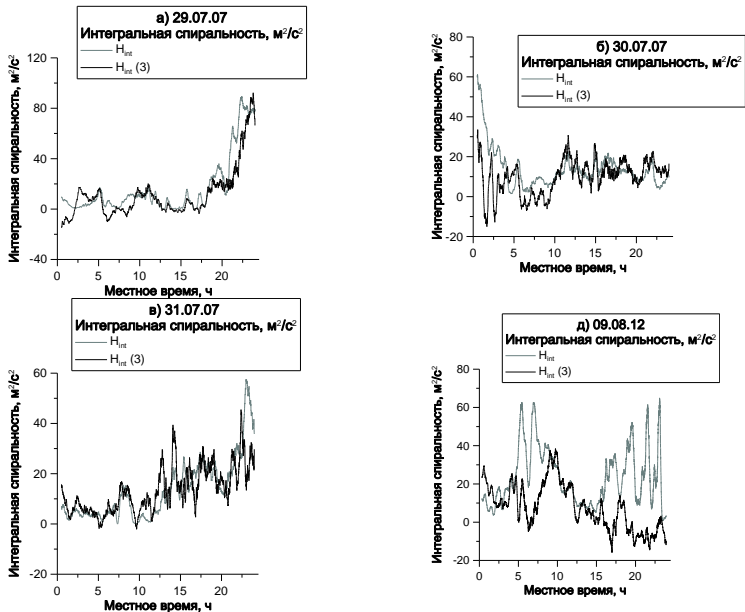


Рис. 4. Связь интегральной спиральности $H_{int}(23)$ и суммы квадратов компонент геострофической скорости ветра H_{int} для 29 (а), 30 (б) и 31 (в) 07.2007 г., Калмыкия; 9(д) 08.2012 г., Цимлянск

В период жизни (действия) циклонических (или иных вихревых) образований, локальные минимумы геопотенциала соответствуют локальным максимумам оценки спиральности. Перед формированием ПМЦ начинается рост оценки спиральности. Затем ПМЦ начинает окклюзировать, границы его расширяются, вращение замедляется, и значение оценки спиральности падает. Ближе к концу анализируемого периода ПМЦ концентрируется в рассматриваемой области, и оценка спиральности снова возрастает. Локальные

изменения спиральности граничат с фронтом циклона. Аналогичные результаты были получены и для случая установления блокирующего антициклона 2010 г. над районом Московской области.

В четвертой главе предложена простая модель развития субмезомасштабных структур (стриков), позволяющая оценить их характерные масштабы в АПС. Приводится исследование развития оптимальных возмущений вблизи поверхности в экмановском слое, что может являться причиной возникновения стриков.

Максимум $F = E(t) / E(0)$ ($E(t)$ – энергия возмущения) сдвигается по волновым числам с ростом α .

Максимальное значение F позволит нам определить характерные масштабы таких возмущений. Однако, для определения примерного масштаба стрика в нашей модели необходимо рассмотреть еще зависимость от угла. Растут возмущения повернутые на отрицательный угол относительно направления геострофического ветра. При увеличении числа Рейнольдса наблюдается уже рост оптимальных возмущений повернутых на положительный угол относительно направления ветра. При $\alpha = 1,2$ максимум роста соответствует возмущениям повернутым под углом $-20 \div -30$ по отношению к ветру с вертикальным волновым числом, близким к 4. При дальнейшем увеличении поперечного волнового числа $\alpha = 3$ максимум ориентирован уже под положительным углом по направлению к ветру и с вертикальным волновым числом 5. При значениях турбулентной вязкости 5 м/с^2 имеем оценки масштабов оптимальных возмущений в нижней части АПС 100-200 по вертикали и 300-600 по горизонтали. Это может рассматриваться как верхняя оценка масштабов стриков.

Близкие к ним значения получены по данным акустического зондирования содаром высокого разрешения. Подобные масштабы можно отметить в обработанных данных микросодара, полученных в летнее время в Цимлянске в 2017 г.

Разработан и апробирован алгоритм выделения конвективной структуры из данных акустического зондирования. На основе данных акустического зондирования 2007, 2016 гг. определены статистические характеристики термоконвективных структур: распределения длительности превышения вертикальной скоростью предельного значения, максимального значения скорости

в пределах этого промежутка времени, общего горизонтального пространственного масштаба. Показана схожесть статистики характеристик термоконвективных структур с распределением Рэля (двумерное распределение Максвелла): плотность вероятности $\rho(U) = \frac{2U}{U_0^2} \exp\left(-\frac{U_m^2 - U^2}{U_0^2}\right)$, где $U_0^2 = [\langle U^2 \rangle - U_m^2]$, $\langle U^2 \rangle$ – средняя квадратичная вертикальная скорость термик, U_m – предельное значение вертикальной скорости термика (рис. 5).

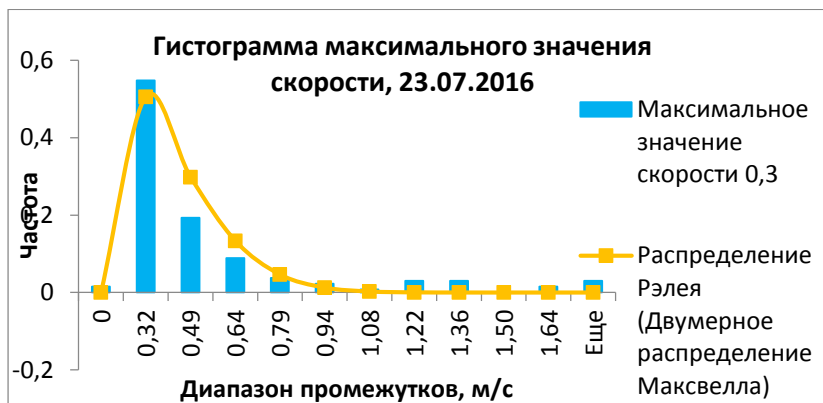


Рис. 5. Гистограмма распределения максимального значения скорости, распределение Рэля (двумерное распределение Максвелла), Калмыкия, 23 июля 2016 г.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. В рамках квазидвумерной модели проведено исследование нелинейных режимов развития упорядоченных структур в экмановском слое. В зависимости от числа Рейнольдса реализуются различные типы гидродинамической неустойчивости, что проявляется во взаимной ориентации возникающей валиковой циркуляции и геострофического ветра, а также в масштабах и пространственных периодах структур. Отмечается рост асимметрии валиков с увеличением эффективного числа Рейнольдса, сопровождающийся заметным увеличением экстремальных значений амплитуды продольной компоненты скорости в направлении, противоположном направлению геострофического ветра, по сравнению с амплитудами по направлению ветра.

Одновременно наблюдается увеличение экстремальных значений положительной компоненты спиральности по сравнению с отрицательной.

2. Исследуется влияние упорядоченных циркуляционных структур на вынос субмикронного аэрозоля в аридных условиях в рамках модели WRF-Chem. Отмечена интенсификация процессов подъема и выноса субмикронного аэрозоля с подстилающих поверхностей аридных зон когерентными структурами. Направление дальнейшего переноса пыли в значительной степени определяется углом отклонения роллов от геострофического ветра и достигает нескольких км. Массовое содержание мелких частиц падает с разрушением структур. В период действия валиковой циркуляции захваченные частицы долгое время находятся во взвешенном состоянии, образуя полосчатую структуру – аэрозольные слои. Некоторое пространственное отклонение области подъема облака пыли может быть вызвано нелинейными эффектами в АПС, неточностью исходных данных по эрозии почвы.

3. Показано увеличение массового содержания субмикронных частиц в АПС при учете несальтационного механизма эмиссии пыли с подстилающей поверхности аридных зон Калмыкии при условии слабых ветров.

4. Предложена и апробирована методика определения спиральности в АПС по данным акустического зондирования. В условиях отсутствия сильной конвекции обнаружена корреляция хода интегральной спиральности с ходом половины квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования. Для плотности спиральности крупномасштабных движений получены средние значения $0,3-0,6 \text{ м/с}^2$, средняя же по слою спиральность в атмосферном пограничном слое оказалась близка к теоретическим и эмпирическим значениям турбулентной спиральности и составляет $0,02-0,12 \text{ м/с}^2$. Значения спиральности валиковой циркуляции, посчитанные по результатам моделирования в модели WRF-ARW, оказываются близкими к данным оценкам.

5. Показана возможность использования спиральности в АПС в качестве прогностического фактора для экстремальных явлений: блокирующего антициклона и полярных мезоциклонов.

6. Предложена простая модель развития субмезомасштабных структур (стриков), позволяющая оценить их

характерные масштабы в АПС. Близкие к ним значения получены по данным акустического зондирования содаром высокого разрешения.

7. Показана схожесть статистики характеристик термоконвективных структур (по данным акустического зондирования) с распределением Рэля (двумерным распределением Максвелла).

Полученные в работе результаты открывают широкие возможности для решения других задач в области исследования циркуляционных структур. В частности, квазидвумерная модель может служить основой для создания вихреразрешающей LES модели с блоком параметризации турбулентной спиральности. Детальный учет интенсифицирующего влияния когерентных структур на процессы выноса и транспорта аэрозоля, а также добавление специфических блоков эмиссии пыли и дальнейшее подключение химических реакций в присутствии газов позволит увеличить точность описания АПС в атмосферных моделях, улучшить понимание роли организованных вихревых структур в процессах тепломассопереноса в АПС. Методика определения спиральности как квадрата скорости ветра на верхних уровнях зондирования позволит упростить процедуру построения глобального и регионального поля спиральности, в частности, при решении прогностических задач для экстремальных событий. Определенное статистическое распределение для термоконвективных структур конкретизирует их зачастую недостаточные статистические выборки и может быть использовано для улучшения прогнозов характеристик метеорологических полей и турбулентности и уменьшению опасности пилотирования самолетов внутри или вблизи области с четко выраженными границами изолированных конвективных потоков и возникающими вследствие этого явления стохастическими неоднородностями АПС. Усовершенствованная модель с оперативным усвоением данных, использующая 4DVar усвоение с учетом истории процессов в АПС, позволит снизить относительной ошибки прогноза и оценить вертикальные профили скорости и температуры для прогноза ветровых сдвигов и порывов ветра в приземном и пограничном слоях атмосферы в условиях минимума исходной метеорологической информации.

Наиболее значимые публикаций автора по теме диссертации

1. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Шестакова Л.В., Максименков Л.О.* Нелинейное развитие структур в экмановском слое // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 197-211.
2. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А., Крамар В.Ф., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д.* Оценка спиральности в атмосферном пограничном слое по данным акустического зондирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53. – № 2. – С. 174-186.
3. *Chkhetiani O. G., Kurgansky M. V., Vazaeva N. V.* Turbulent Helicity in the Atmospheric Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorology. – 2018. – V. 168 – P. 361–385.
4. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О.* Организованная валиковая циркуляция и транспорт минеральных аэрозолей в атмосферном пограничном слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55. – № X. – С. XXX—XXX (принята в печать).
5. *Вазаева Н.В., Куличков С.Н., Максименков Л.О., Чхетиани О.Г.* Программно-алгоритмический комплекс пространственного и временного прогнозирования турбулентности, температуры и ветра в нижней тропосфере на неосвещённой в метеорологическом отношении территории в условиях минимума исходной метеорологической информации, Труды 4 ЦНИИ Минобороны России, вып. 124. – Королёв: 4 ЦНИИ, 2015. – С. 81-86.
6. *Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В.* Об оптимальных возмущениях в экмановском слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2019. (представлена к публикации).
7. *Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Kulichkov S.N., Maksimenkov L.O.* On the Experience of Forecasting of the Atmospheric Boundary Layer Characteristics by Applying the Sodar and Temperature Profiler Data [Digital resource] // "ISARS - 2016". 6 - 9 June, 2016, Varna, Bulgaria, III-6.
8. *Вазаева Н.В., Максименков Л.О., Куличков С.Н., Чхетиани О.Г.* Модель прогноза вертикальных профилей температуры и ветра в нижней тропосфере на большой площади на основе

использования данных содара и температурного профилемера // Метеоспектр, специальный выпуск. Материалы научно-технической конференции «Вопросы научной и технической поддержки совершенствования метеорологического обеспечения гражданской авиации». – 2016. – Т. 4 – С. 59-67.

9. *Вазаева Н.В., Гледзер Е.Б., Курганский М.В., Лебедев В.А., Обвинцев Ю.И., Чхетиани О.Г.* Вынос аридного аэрозоля в условиях слабых ветров // 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». 25–29 мая 2015 года. Туапсе. Сборник тезисов докладов. – М.-Туапсе: ГЕОС, 2015.
10. Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере. Под ред. О.Г. Чхетиани, М.Е. Горбунова, С.Н. Куличкова, И.А. Репиной. М.: ГЕОС, 2017. 508 с. [с. 130-146].
11. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Курганский М.В.* Оценки спиральности в атмосферном пограничном слое. // Тезисы Докладов молодых ученых XVII научной школы "Нелинейные волны-2016". – Нижний Новгород, 2016. – С. 40.
12. *Вазаева Н.В., Чхетиани О. Г., Максименков Л.О., Курганский М.В.* Интегральные характеристики полярных мезоциклонов // Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Тезисы докладов. – Иркутск: ООО «Типография Оттиск», 2017.
13. *Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A., Kurgansky M.V., Lebedev V.A., Maximenkov L.O. and Obvintsev Y.I.* Aerosol emission in the arid zones of southern russia // Report Series In Aerosol Science № 201 (2017): Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting, Helsinki 2017, ISSN 0784-3496, ISBN 978-952-7091-86-9 (electronic publication)
14. *Vazaeva N. et al.* Aerosol Layers Formation by Mesoscale Circulation // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2018. – Т. 20.

15. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Чернокульский А.В., Максименков Л.О.* Образование аэрозольных слоев в атмосферном пограничном слое с мезомасштабной циркуляцией // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Сборник тезисов докладов. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 41.
16. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Чернокульский А.В., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Миллер Е.А., Юшков В.П.* Прогноз вертикальных распределений температуры и ветра в атмосферном пограничном слое с использованием модели WRF-ARW и усвоением данных содара и температурного профилера // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Сборник трудов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. – М.: Физматкнига, 2018. – (в печати).
17. *Крамар В.Ф., Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д.* Содар для исследований микроструктуры приземного слоя атмосферы // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Сборник трудов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. – М.: Физматкнига, 2018. – (в печати).
18. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О.* Аэрозольные слои и транспорт минерального аэрозоля в атмосферном пограничном слое с мезомасштабной циркуляцией // 22-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». 23–29 мая 2018 года. Майкоп. Тезисы докладов. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2018. – 105 с. – С. 50.

Список литературы

1. Вульфсон А. Н., Бородин О. О. Система конвективных термиков как обобщённый ансамбль броуновских частиц // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 2. – С. 113-124.
2. Гранберг И.Г., Крамар В.Ф., Кузнецов Р.Д., Чхетиани О.Г., Каллистратова М.А., Куличков С.Н., Артамонова М.С., Кузнецов Д.Д., Перепелкин В.Г., Погарский Ф.А. Исследование пространственной структуры атмосферного пограничного слоя сетью доплеровских содаров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45 №5. – С.579-587.
3. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С. Климатология аэрозолей и облачность. – СПб.: ВВМ, 2008. – 556 с.
4. Курганский М.В. О связи между спиральностью и потенциальным вихрем в сжимаемой вращающейся жидкости. // Изв. АН, Физика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 25, № 12. – С. 1326-1329.
5. Михайлова Л.А., Орданович А.Е. Когерентные структуры в пограничном слое атмосферы. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1991. – Т. 27. – С.593-613.
6. Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. Полуэмпирическая модель пограничного слоя атмосферы с параметризацией влияния турбулентной спиральности. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41, № 4. – С. 464-479.
7. Bagnold, R. A.: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, New York, 265 pp., 1941.
8. Chkhetiani O. G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // Atmos. Chem. Phys. – 2012. – Т. 12. – №. 11. – С. 5147-5162.
9. Chou S.H., Ferguson M.P. Heat fluxes and roll circulations over the western Gulf Stream during an intense cold-air outbreak. // Boundary-Layer Meteorology. – 1991. – V. 55, Issue 3. – P. 255-281.
10. Deardorff J. W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers // J. Atmos. Sci. – 1972. – V. 29. №. 1. – P. 91-115.

11. Drobinski P., Carlotti P., Newsom R.K., Banta R.M., Foster R.C. and Redelsperger J.L. The Structure of the Near-Neutral Atmospheric Surface Layer. // *J. Atm. Si.* – 2004. – V.61. – P. 699-714.
12. Drobinski P., Carlotti P., Redelsperger J.-L., Banta R., Masson V., Newsom R. Numerical and experimental investigation of the neutral atmospheric surface layer. // *J. Atmos. Sci.* – 2007. – V. 64. – P. 137-156.
13. Foster R.C., Levy G. The contribution of organized roll vortices to the surface wind vector in baroclinic conditions. // *J. Atm. Sci.* – 1998. – V.55. – P.1466-1472.
14. Foster R. Signature of large aspect ratio roll vortices in synthetic aperture radar images of tropical cyclones // *Oceanography.* – 2013. – V. 26. №. 2. – P. 58-67.
15. Golitsyn G. S. et al. Investigation of boundary layer fine structure in arid regions: Injection of fine dust into the atmosphere // *Water, Air and Soil Pollution: Focus.* – 2003. – V. 3, №. 2. – P. 245-257.
16. Gorchakov G. I., Koprov B. M., and Shukurov K. A.: Arid aerosol transport by vortices // *Izvestia, Atmos. Ocean. Phys.* – 2003. – V. 39. – P. 596-608.
17. Hernandez-Deckers D., Sherwood S.C. A numerical investigation of cumulus thermals // *J. Atm. Sci.* – 2016. – T. 73. – №. 10. – C. 4117-4136.
18. Hide R. Superhelicity, helicity and potential vorticity. // *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* – 1989. – V.48, №1-3. – P.69-79.
19. Klose M. and Shao Y.: Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* – 2012. – V. 12. – P. 3263–3293.
20. Petenko I. V., Bezverkhni V. A.: Temporal Scales of Convective Coherent Structures Derived from Sodar Data, *Meteorol.* // *Atmos. Phys.* – 1999. – V. 71. – P. 105-116.
21. Skamarock W.C. et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3. // *NCAR Techn. Note–475 + STR.* – June 2008. – 125 pp.