

*На правах рукописи*



Струнин Александр Михайлович

СПЕКТРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ  
ПОТОКОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ПО  
ДАНЫМ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Специальность

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
«Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета

Научный руководитель *доктор технических наук,  
кандидат физико-математических наук,  
главный научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
«Центральная аэрологическая обсерватория»  
Росгидромета,*

***Кадыгров Евгений Николаевич***

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Институт вычислительной  
математики Российской академии наук,*

***Глазунов Андрей Васильевич***

*доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Институт физики атмосферы им. А.М.  
Обухова Российской академии наук*

***Репина Ирина Анатольевна***

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Научно-производственное  
объединение «Тайфун» Росгидромета*

Защита состоится «01» октября 2015 г. в 14:00 на заседании  
диссертационного совета Д.002.096.01 по защите докторских и кандидатских  
диссертаций в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,  
расположенным по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы  
им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Автореферат разослан «25» августа 2015 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные  
печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого  
секретаря диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д.002.096.01 по защите  
докторских и кандидатских диссертаций,  
кандидат географических наук

Л.Д. Краснокутская

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Турбулентность – хаотически неупорядоченное движение объемов воздуха самых различных масштабов – является одним из характерных свойств атмосферных воздушных течений, изучение ее необходимо для решения ряда теоретических и прикладных задач. Теоретические и экспериментальные основы атмосферной турбулентности изложены в фундаментальных трудах А.С. Мони́на и А.М. Ягло́ма. Наиболее ярко выраженными зонами в атмосфере, где развивается турбулентность, являются планетарный пограничный слой, струйные течения на высотах и облака. Особенности динамической структуры однородного пограничного слоя довольно хорошо известны, основы которой были заложены А.М. Обу́ховым и А.С. Мо́ниным.

Турбулентность и воздушные движения являются определяющими факторами образования и развития облаков различных форм, поэтому получение статистически обеспеченных данных об интенсивности турбулентности, ее пространственной и, в особенности, о ее спектральной структуре является одной из важнейших задач по исследованию атмосферы. Данные о спектральных свойствах турбулентности и турбулентных потоков нужны для исследования микрофизического строения облаков. Спектральные характеристики турбулентности необходимы также для полноценного численного моделирования процессов облако- и осадкообразования, являющимся на сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений атмосферных исследований.

Особую важность в настоящее время имеют исследования турбулентности в облаках вертикального развития, которые дают наиболее интенсивные осадки и зачастую представляют угрозу для жизнедеятельности человека из-за возникающих шквалов. Сведения о турбулентности в облаках необходимы для обеспечения безопасности полетов самолетов и построения моделей атмосферной турбулентности для расчетов прочности летательных аппаратов и разработки систем их управления.

Необходимо отметить, что спектральная структура турбулентности конвективных облаков исследована значительно хуже, чем, например, конвективный пограничный слой. В настоящее время не существует и модели

спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков тепла в облаках вертикального развития, в литературе имеются лишь отдельные данные о спектральных плотностях пульсаций скорости.

Для полноценного исследования турбулентности в облаках необходимо корректно измерять пульсации вертикальной и горизонтальной компонент скорости ветра и температуры воздуха, которые позволяют рассчитать спектральные характеристики турбулентности и турбулентных потоков тепла и импульса. С этой точки зрения самолёт-лаборатория является наиболее эффективным средством исследования конвективных облаков, поскольку позволяет проводить практически мгновенные разрезы облаков на различных высотах и измерять помимо турбулентности и микрофизические (например, влажность) параметры облаков.

**Объектом** исследований в настоящей работе являются конвективные облака тропической зоны, развивающиеся над о. Куба. Исследования проводились над метеорологическим полигоном в районе г. Камагуэй, расположенном в центре острова. Причинами возникновения облаков в этом районе были как конвекция за счет прогрева поверхности, так и конвергенция воздушных потоков, приходящих с Атлантического океана и Карибского моря.

**Предметом** исследования является структура циркуляции в отдельной ячейке, включая само облако и окружающее пространство. Необходимо отметить, что динамически облака и прилегающее к ним области составляют единое целое, поскольку процессы облакообразования оказывают существенное влияние на окружающее их безоблачное пространство. Особое внимание в работе было уделено спектральным характеристикам турбулентных движений и турбулентных потоков, являвшихся как причиной, так и результатом развития облаков.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью настоящей диссертационной работы являлось выявление особенностей спектральных характеристик турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры, турбулентных потоков тепла и импульса в конвективных облаках тропической зоны и получение универсальных функций описывающих спектральную структуру турбулентности в этих облаках.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

-Создать и апробировать метод, учитывающий влияние водности облака на самолетный датчик температуры и подготовить программы для расчета истинной температуры воздуха и ее пульсаций в облаках с жидко-капельной фракцией;

-Обосновать выбор метода спектрального анализа неоднородной турбулентности в конвективных облаках;

-Провести обработку и анализ самолетных данных о турбулентности в тропических конвективных облаках над о. Куба;

-Рассчитать спектральные характеристики (спектральные плотности пульсаций, спектры и коспектры), выявить управляющие параметры, отвечающих за вид универсальных функций, описывающих спектральную структуру турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках тропической зоны;

-Определить универсальные функции, описывающие спектральную структуру турбулентности в конвективных облаках тропической зоны и рассчитать их параметры.

## **Методы исследований**

В Центральной аэрологической обсерватории накоплен обширный материал о турбулентности в тропических облаках вертикального развития над о. Куба. В качестве основного средства исследования турбулентности использовался специально оборудованный самолет-лаборатория, причем измерения с борта самолета дополнялись наземными радиолокационными наблюдениями за облаками.

Для анализа накопленного материала были применены современные методы компьютерной обработки данных, включая вейвлет-преобразование с базисной функцией Морле, для чего были подготовлены специальные программы обработки данных. Для получения корректных спектральных характеристик пульсаций температуры и турбулентных потоков тепла при анализе и обработке данных использовался вновь разработанный метод учета влияния облачных капель на показания датчика температуры. Для представления спектральных характеристик турбулентности и турбулентных потоков использовались методы нормировки данных и определялись управляющие параметры, характеризующие формы спектральных кривых.

## **Научная новизна**

Предложен новый метод определения истинной температуры воздуха и ее пульсаций в облаках с жидко-капельной фракцией (до температуры воздуха выше  $-8^{\circ}\text{C}$ ).

Впервые выявлена зависимость спектральных характеристик турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры и турбулентных потоков в конвективных облаках от стадии их развития.

Впервые получены универсальные функции спектральных характеристик турбулентных потоков тепла и импульса в зоне конвективных облаков.

Впервые рассчитаны значения среднеквадратических пульсаций скорости ветра и температуры, коэффициента турбулентного перемешивания и эмпирические функции их распределения в конвективных облаках тропической зоны в зависимости от стадии их развития.

## **Научная и практическая значимость результатов**

Данные о характеристиках турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры и потоков тепла и импульса в облаках вертикального развития необходимы для понимания физических процессов образования и развития облаков и осадков.

Метод введения поправки на влажность облака при самолетных наблюдениях позволяет определять истинную температуру воздуха и ее пульсации в облаках с жидко-капельной фракцией.

Универсальные кривые спектральных плотностей пульсаций и коспектров потоков тепла и импульса могут быть использованы для компьютерного моделирования процессов облако- и осадкообразования.

Полученные спектральные характеристики турбулентности, эмпирические функции распределения параметров турбулентности в облаках могут быть использованы для расчета прочностных характеристик летательных аппаратов, создания систем их управления, обеспечения безопасности полетов.

## **Положения, выносимые на защиту**

Метод определения истинной температуры воздуха и ее пульсаций для самолетных наблюдений в облаках с жидко-капельной фракцией.

Спектральные характеристики турбулентности в конвективных облаках тропической зоны, полученные для различных стадий развития облаков.

Универсальные функции, описывающие спектральные характеристики турбулентности в конвективных облаках тропической зоны для различных стадий их развития.

Эмпирические функции распределения среднеквадратических значений пульсаций и величин коэффициента турбулентного перемешивания для конвективных облаков тропической зоны на различных стадиях их развития.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов исследований подтверждается их сопоставлением с данными, полученными различными исследователями конвективных облаков. Разработанный метод определения истинной температуры воздуха и ее пульсаций для самолетных наблюдений в облаках с жидко-капельной фракцией обоснован теоретически и подтвержден в результате анализа данных самолетных наблюдений.

### **Публикации автора**

По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 – в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, получен 1 патент на полезную модель.

### **Апробация работы (доклады на конференциях)**

Результаты настоящей диссертационной работы доложены на следующих Всероссийских и международных конференциях:

16-ой Международной конференции по физике облаков, Лейпциг (Германия), 31 июля – 3 августа 2012 г.

Конференции молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 4-6 июня 2013 г, г. Обнинск (Россия).

Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», СКФУ-ВГИ-РГГМУ, Ставрополь, 23 - 26 сентября 2013 г.

Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-

летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, г. Нальчик, 7-9 октября 2014 г., ВГИ.

5-ой Международной научной школе молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», Москва, 25 - 28 ноября 2014 г., «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН.

II-ой Всероссийской научной конференции «Экология и космос» им. академика К.Я. Кондратьева, Санкт-Петербург, 10 – 11 февраля 2015 г., Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

Результаты диссертации докладывались также на семинарах и заседаниях Ученого совета Центральной аэрологической обсерватории, геофизическом семинаре НИВЦ МГУ.

### **Личный вклад автора**

Создание и апробация метода, доработка существующих программ для расчета истинной температуры воздуха и ее пульсаций в облаках с жидко-капельной фракцией.

Обработка и анализ имеющихся самолетных данных о турбулентности в конвективных облаках тропической зоны над о. Куба (расчет спектров пульсаций и коспектров потоков, выявление параметров, определяющих их вид и классификация спектральных характеристик в зависимости от управляющих параметров).

Получение универсальных функций, описывающих спектральную структуру пульсаций и турбулентных потоков в облаках вертикального развития в зависимости от стадии их развития.

Получение эмпирических функций распределения параметров турбулентности (среднеквадратических значений пульсаций и величин коэффициента турбулентного перемешивания) в конвективных облаках в зависимости от стадии их развития.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из пяти глав и списка используемой литературы, одного приложения. Общий объем диссертации составляет 138 страниц. Диссертация содержит 35 рисунков и 5 таблиц, библиография диссертации включает в себя 122 наименования.



## Содержание работы

В первой главе (Введении) раскрывается актуальность диссертационной работы, формулируется научная новизна результатов, их научная и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, публикации автора по теме диссертации, перечень докладов по теме диссертации (апробация работы) и определяется личный вклад автора в работу.

В этой же главе приводится обзор литературы по имеющимся экспериментальным данным о турбулентности в облаках вертикального развития, или конвективных ячейках, обозначаемых далее для простоты как  $S_i$ , методах измерения турбулентности с помощью самолета-лаборатории, современных методах спектрального анализа атмосферной турбулентности.

Показано, что имеющихся в литературе данных о воздушных движениях в конвективных облаках недостаточно для решения задач моделирования процессов облако- и осадкообразования и других прикладных задач. В особенности это относится к данным о спектральной структуре турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры воздуха, а экспериментальные сведения о спектральной структуре турбулентных потоков тепла и импульса в зоне  $S_i$  в литературе практически отсутствуют. В данной главе приводится также краткий обзор методов измерения турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры с борта самолета-лаборатории. Отмечается, что для корректного измерения пульсаций температуры в облаке с жидко-капельной фракцией и последующего корректного расчета турбулентных потоков тепла в зоне  $S_i$  необходимо вводить поправку в показания самолетного пульсационного термометра на водность облака. Отмечается, что существующие методы измерений в облаках с жидко-капельной фракцией не позволяют корректно определять пульсации температуры. В обзорной части проводится и анализ современных методов расчета спектральных характеристик атмосферной турбулентности – спектров пульсаций и коспектров потоков. Показано, что турбулентные пульсации скорости ветра и температуры в конвективных облаках крайне неоднородны, что затрудняет применение традиционного Фурье-анализа для расчета спектров и коспектров и, как правило, не позволяет получить корректные результаты. Другим фактором, затрудняющим применение Фурье-преобразования, являются

относительно малые горизонтальные размеры исследуемых конвективных облаков (а, значит и малые размеры получаемых реализаций пульсационных компонент), что приводит к погрешностям в получаемых спектрах, носящих вычислительный характер. Показано, что вейвлет-преобразование, свободное от многих недостатков, присущих Фурье-анализу, позволяет получать корректные спектральные характеристики турбулентности в облаках, в том числе и при малой длине реализаций. Показано также, что наиболее приемлемым для исследования атмосферной турбулентности является вейвлет-преобразование с базовой функцией Морле, поскольку в этом случае минимизируются вычислительные погрешности расчета спектральных характеристик турбулентности.

**Во второй главе** излагаются цели настоящей диссертационной работы и формулируются задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

**В третьей главе** приводится описание российско-кубинского самолетного эксперимента по исследованию конвективных облаков над о. Куба в августе – октябре 2007 г. на метеополигоне в районе г. Камагуэй, данные которого были использованы в настоящей диссертационной работе. На борт самолета Ан-26 была установлена аппаратура для измерения и регистрации пульсаций горизонтальной (продольной, по отношению к направлению полета самолета) компоненты скорости ветра  $u'$ , вертикальной компоненты скорости ветра  $w'$  и пульсаций температуры  $T'$ . Регистрация данных осуществлялась с частотой 20 отсчетов в с на жестком диске бортового компьютера. Для условий горизонтального установившегося полета (т.е. при малости изменений углов крена, тангажа и скольжения) турбулентные пульсации определялись из выражений:

$$u' = -U + U_p + U \sin \Delta\alpha \sin \Delta\theta + U \sin \Delta\alpha \quad (1)$$

$$w' = (\Delta\alpha - \Delta\theta)U + L\dot{\theta} + W_p \quad (2)$$

где  $\Delta\alpha$  - приращения угла атаки воздушного потока, набегающего на самолет,  $\Delta\theta$  - приращения угла тангажа на горизонтальном режиме полета самолета, а  $L\dot{\theta} + W_p$  - суммарная скорость собственного вертикального перемещения самолета и вращения самолета вокруг поперечной оси. Приращения угла атаки

набегающего на самолет потока вычислялись по приращениям перегрузки центра тяжести самолета. Путевая скорость самолета  $U_p$  определялись по показаниям установленной на самолете системы глобального позиционирования GPS. Суммарная скорость собственного вертикального перемещения самолета  $W_p$  и вращения самолета вокруг поперечной оси  $L\dot{\theta}$  вычислялась интегрированием приращений вертикальной перегрузки самолета  $\Delta n$  и дифференцированием изменений барометрической высоты самолета  $h_b$ . Для расчета истинных значений пульсаций температуры воздуха  $T'$  использовалась следующая формула:

$$T' = T - \bar{T} + \zeta \Delta h_b \quad (3)$$

где  $\zeta$  - вертикальный градиент температуры воздуха на уровне полета самолета,  $\bar{T}$  - средняя температура воздуха, определенная по всему измерительному участку, а  $\Delta h_b$  - изменения барометрической высоты самолета на этом участке. Градиент температуры определялся по результатам вертикальной зондировки при подъеме на рабочую высоту перед началом исследований облаков. Абсолютные среднеквадратические погрешности измерения турбулентных пульсаций скорости и температуры составили:  $\delta u' = \pm(\gamma_{u_0} + \gamma_u u')$ ;  $\delta w' = \pm(\gamma_{w_0} + \gamma_w w')$ ;  $\delta T' = \pm(\gamma_{T_0} + \gamma_T T')$ , где  $\gamma_{u_0} = 0,1$   $\text{мс}^{-1}$ ,  $\gamma_{T_0} = 0,02$  К и  $\gamma_{w_0} = 0,1$   $\text{мс}^{-1}$  - начальные чувствительности пульсаций скорости ветра и температуры,  $\gamma_u = 0,07$ ,  $\gamma_w = 0,08$  и  $\gamma_T = 0,08$  - среднеквадратические относительные погрешности измерений текущих значений пульсаций  $u'$ ,  $w'$  и  $T'$ . Всего в период с 17 августа по 4 октября 2007 г. над метеополигоном вблизи г. Камагуэй было выполнено 13 полетов, в результате которых было исследовано более 60 конвективных ячеек. Контроль перемещения ячеек проводился с помощью наземного метеорологического радиолокатора. Полученные во время эксперимента данные были использованы для выявления закономерностей спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков в зонах Cu. Облака, в которые входил самолет-лаборатория на высоте 5 км, можно было охарактеризовать как Cu cong

относительно небольшой мощности с максимальной высотой верхней границы 7 – 8 км.

**В четвертой главе** приводятся результаты анализа данных о турбулентности и турбулентных потоках в облаках конвективного развития тропической зоны.

Метод учета влияния водности и его валидация. С целью обеспечения корректного анализа полученных данных был разработан метод введения поправки в температуру воздуха и ее пульсации на флюктуации водности в облаке, поскольку одновременно с измерениями турбулентности проводились измерения полной и жидко-капельной водности с помощью прибора конструкции А.Н. Невзорова. Применяемый пульсационный датчик температуры был частично смачиваемым, причем логично было предположить, что поправка на смачиваемость зависела от величины жидко-капельной водности и степени нагрева воздуха в зоне чувствительного элемента датчика за счет частичного торможения потока. Поправка в пульсации температуры на водность облака вводилась при обработке данных по следующей формуле:

$$T'_c = T' + k_w \Delta T^* Lwc \quad (4)$$

где  $k_w$  - коэффициент влияния водности на измеряемую температуру,  $T'$  - измеренные пульсации температуры воздуха с учетом динамического нагрева,  $T'_c$  - истинные пульсации температуры в облаке с жидко-капельной фракцией,  $\Delta T^* = 0,2rM^2T$  - динамический нагрев воздуха за счет торможения потока в датчике температуры, а  $Lwc$  - мгновенные значения жидко-капельной водности. Данные, полученные в самолетных экспериментах, позволили провести независимую оценку величины коэффициента  $k_w$ , основанную на известных закономерностях о турбулентном обмене в атмосфере - турбулентный поток тепла в атмосфере всегда направлен из более теплой области в более холодную. Поскольку на ранних стадиях развития конвективные облака были теплее окружающей среды, горизонтальный поток тепла через боковые границы облака должен быть направлен из облака в околооблачное пространство. Анализ рассчитанных горизонтальных потоков тепла показал, что непротиворечивая картина распределения потоков тепла для всех рассматриваемых случаев одновременно наблюдалась при значении  $k_w$

$=0,17 \text{ м}^3 \text{ г}^{-1}$ . Изменения в потоках тепла, обусловленные поправкой на влажность иллюстрируются скалограммами, приведенными на рисунке 1. Для расчета скалограмм применялось вейвлет-преобразование с функцией Морле с собственной частотой  $\omega_0 = 6$ . Анализ данных также показал, что погрешность определения коэффициента  $k_w$  не превысила 14%, а абсолютная величина дополнительной погрешности при измерениях температуры в облаках была не более  $0,18 \text{ }^\circ\text{C}$  (при температурах воздуха не ниже  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ , которые обеспечивали

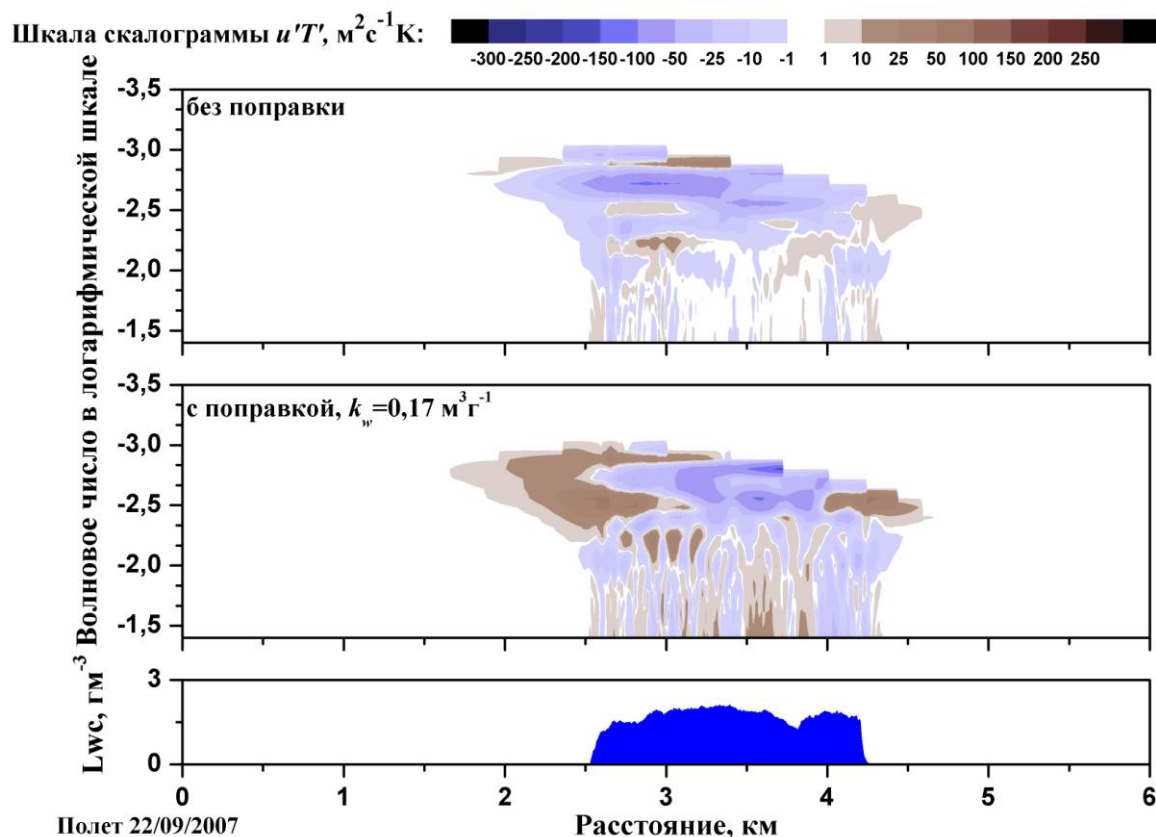


Рисунок 1 - Скалограммы горизонтальных потоков тепла в зоне  $\text{Cu}$ , рассчитанные с поправкой на влажность и без поправки. Коричневыми тонами выделены зоны, в которых потоки тепла направлены против направления полета самолета, а синими – по направлению полета. Направление полета: слева - направо. Внизу представлен профиль жидко-капельной влажности в облаке, определяющий его границы.

положительные значения температуры поверхности датчика за счет торможения потока).

Спектральная структура турбулентности в зоне  $\text{Cu}$ . Известно, что кучевые облака существенным образом изменяют структуру полей термодинамических параметров, причем зона возмущения от  $\text{Cu}$  по площади может более чем вдвое превосходить размеры самого облака. Поэтому при исследовании структуры воздушных движений кучевых облаков рассматривалась так называемая зона

Си, т.е. как само облако, так и окружающее его пространство, в котором наблюдаются возмущения. При проведении самолетных измерений эта особенность учитывалась, и измерительные режимы начинались на достаточном расстоянии перед облаком и заканчивались приблизительно на таком же расстоянии после облака. Поскольку турбулентные движения в конвективных облаках были крайне неоднородны, для анализа спектральной структуры турбулентных пульсаций и турбулентных потоков было применено вейвлет-преобразование Морле. По реализациям пульсаций скорости ветра и температуры рассчитывались матрицы скалограмм, по которым определялись вейвлет-спектры пульсаций горизонтальной  $E_u(k)$  и вертикальной компонент скорости ветра  $E_w(k)$ , температуры воздуха  $E_T(k)$  и вейвлет-коспектры потоков тепла  $Co_{wT}(k)$  и импульса  $Co_{uw}(k)$  (здесь  $k$  - волновое число). Для того чтобы выявить некоторые общие закономерности спектральной структуры турбулентности в зоне Си, рассчитанные для этих зон вейвлет-спектры пульсаций компонент скорости ветра и температуры и вейвлет-коспектры потоков тепла и импульса были нормированы с помощью дисперсий  $\sigma_u^2$ ,  $\sigma_w^2$ ,  $\sigma_T^2$  и ковариаций  $cov_{wT}$ ,  $cov_{uw}$ :

$$\Phi_u(k) = \frac{kE_u(k)}{\sigma_u^2} \quad \Phi_w(k) = \frac{kE_w(k)}{\sigma_w^2} \quad \Phi_T(k) = \frac{kE_T(k)}{\sigma_T^2} \quad (5)$$

$$\Phi_{wT}(k) = \frac{kCo_{wT}(k)}{cov_{wT}} \quad \Phi_{uw}(k) = \frac{kCo_{uw}(k)}{cov_{uw}} \quad (6)$$

Рассчитывались также нормированные спектры и коспектры в зависимости от нормированного волнового числа:

$$\Phi_u(\eta) = \frac{kE_u}{\sigma_u^2} \quad \Phi_w(\eta) = \frac{kE_w}{\sigma_w^2} \quad \Phi_T(\eta) = \frac{kE_T}{\sigma_T^2} \quad (7)$$

$$\Phi_{wT}(\eta) = \frac{kCo_{wT}}{cov_{wT}} \quad \Phi_{uw}(\eta) = \frac{kCo_{uw}}{cov_{uw}} \quad (8)$$

Нормированные волновые числа  $\eta = k\lambda_{max}$ , входящие в формулы (7) и (8) определялись по характерным размерам вихрей  $\lambda_{max}$  соответствующих максимумов на спектрах и коспектрах. В результате анализа удалось выделить

три квазистационарные стадии развития тропических конвективных облаков, причем наиболее явно это отражалось в распределениях коспектров потоков

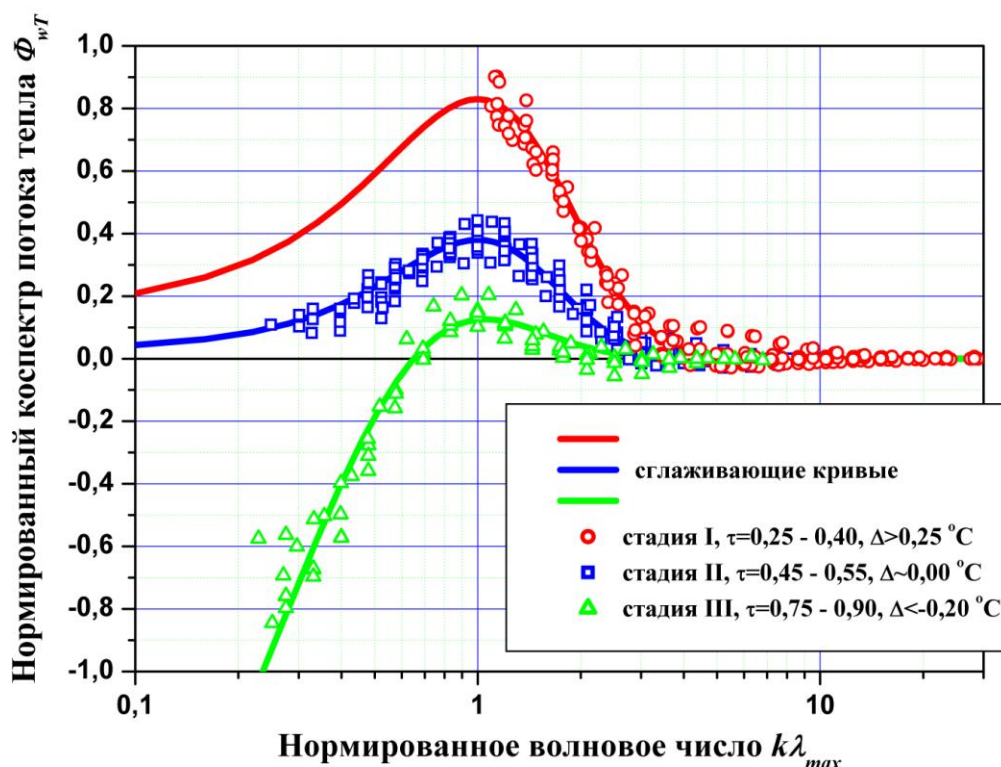


Рисунок 2 - Нормированные коспектры вертикальных потоков тепла  $\Phi_{wT}(\eta)$  и сглаживающие их функции для различных стадий развития конвективных ячеек

тепла (см. рисунок 2). Критерием для отбора коспектров в первом приближении послужило относительное время жизни конвективной ячейки  $\bar{\tau} = \tau / \tau_0$ , определенное по данным наземного радиолокатора (здесь  $\tau_0$  - время существования ячейки, а  $\tau$  - момент осуществления измерений, отсчитываемый от первого появления радиоэха от ячейки). Поскольку точность определения стадии развития облака была невелика, распределение данных проводилось по диапазонам величины  $\bar{\tau}$ : для начальной стадии (где  $\bar{\tau} \approx 0,25 - 0,40$ ), стадии максимального развития ячейки ( $\bar{\tau} \approx 0,45 - 0,55$ ) и стадии диссипации ( $\bar{\tau} \approx 0,75 - 0,90$ ). Удалось выделить три различные модели коспектров потоков тепла и импульса,  $\Phi_{wT}(\eta)$ , обозначенные как коспектры

для стадий развития конвективных ячеек I, II и III соответственно. Однако более точным критерием классификации спектров и коспектров в зоне Cu служила степень перегрева облака относительно окружающей его среды. Так, степень перегрева облака (разность температуры  $\Delta$  воздуха в облаке с учетом поправки в соответствии с формулой (4) и в окружающем облаку воздухе) в диапазоне  $\Delta = 0,47 \pm 0,28$  °C четко определяла коспектры для стадии начального развития облака, или стадии I,  $\Delta = 0,06 \pm 0,07$  °C – стадии зрелого облака, или стадии II, а  $\Delta = -0,46 \pm 0,11$  °C – стадии III, или стадию диссипации облака. Отметим, что в рассматриваемых экспериментах облаками, попадающими на стадию диссипации, являлись так называемые фидерные облака, распадающиеся за счет перераспределения их энергии в более мощные конвективные ячейки. Разброс величин индивидуальных коспектров и спектров для каждой выделенной группы на рисунке 2 не превышал обычного разброса точек на спектрах и коспектрах, полученных различными авторами для пограничного слоя атмосферы. Это обстоятельство позволило сгладить значения коспектров  $\Phi_{wT}(\eta)$  и спектров  $\Phi_w(\eta)$  и  $\Phi_T(\eta)$  для стадий I и II с помощью универсальных функций вида:

$$Y_{I,II}(\eta) = Ae^{-e^{-z}-z+1} \quad (9)$$

где  $z = \frac{\eta - 1}{\mu}$ . Для коспектров  $\Phi_{wT}$  стадии III (имевших, в отличие от одномерных спектров, существенную отрицательную часть) сглаживание было проведено с помощью функции:

$$Y_{III}(\eta) = B[e^{-a_2(\eta-1)} - e^{-a_1(\eta-1)}] \quad (10)$$

Были определены параметры всех сглаживающих функций. Усредненные коспектры  $\overline{\Phi_{wT}}(k)$  и  $\overline{\Phi_{uw}}(k)$  для трех стадий развития тропических Cu представлены на рисунке 3.

Аналогичным образом были классифицированы и нормированные спектры пульсаций компонент скорости ветра и температуры воздуха (рисунок 4), с той, однако, разницей, что для одномерных спектров (которые характеризуют энергию исследуемого сигнала) не обнаружено существенной различий в формах кривых для стадий развития облака с малым перегревом воздуха или с отрицательным ( $\Delta < 0,10$  °C).



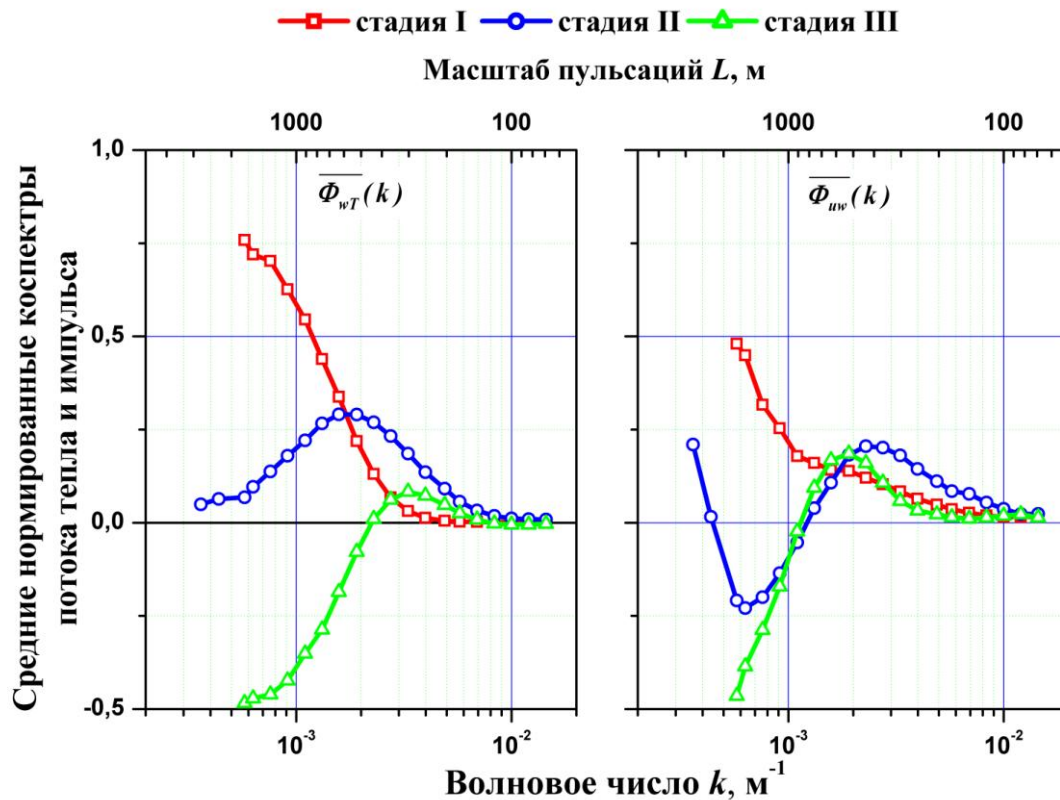


Рисунок 3 - Средние нормированные коспектры турбулентных вертикальных потоков тепла  $\overline{\Phi_{wT}}(k)$  и импульса  $\overline{\Phi_{uw}}(k)$  для различных стадий развития облака (стадии I, II и III)

Различия в спектрах пульсаций для облаков стадий I и II нашли свое отражение и в средних значениях среднеквадратических пульсаций, определяемых по дисперсиям соответствующих пульсаций для отдельных зон конвективных облаков по формуле:  $\overline{\sigma_{u,w,T}} = \left( \frac{1}{N} \sum \sigma_{u,w,T}^2 \right)^{1/2}$  (здесь  $N$  – число исследованных конвективных зон). Данные о средних значениях приведены в таблице 1.

Таблица 1

Стадия развития облака	$\overline{\sigma_u}, \text{ мс}^{-1}$	$\overline{\sigma_w}, \text{ мс}^{-1}$	$\overline{\sigma_T}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\overline{K_m}, \text{ м}^2\text{с}^{-1}$
Стадия I	1,3	2,0	0,45	196
Стадия II	1,2	1,4	0,35	63

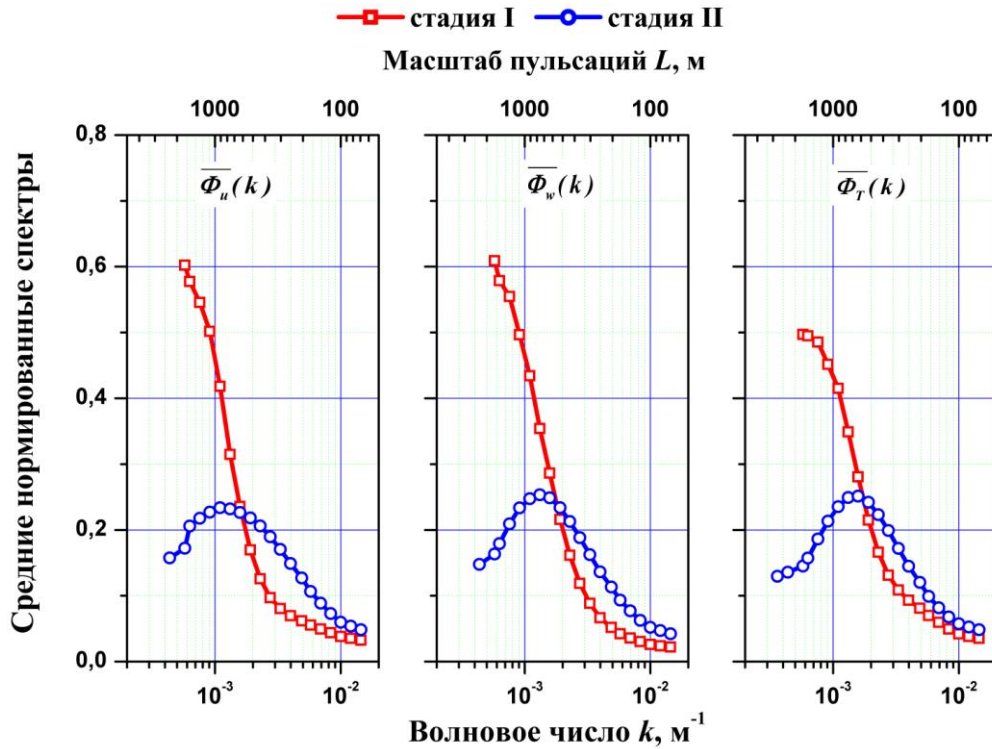


Рисунок 4 - Средние нормированные спектры пульсаций горизонтальной  $\overline{\Phi}_u(k)$ , вертикальной  $\overline{\Phi}_w(k)$  компонент скорости ветра и пульсаций температуры воздуха  $\overline{\Phi}_T(k)$  для различных стадий развития облака (стадии I и II)

Как следует из таблицы, конвективные ячейки на стадии развития I характеризуются в среднем существенно большей интенсивностью турбулентности, чем облака стадии II, что особенно сильно выражено для пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра и для коэффициента турбулентного перемешивания. Кроме того, даже пульсации горизонтальной компоненты скорости ветра и пульсации температуры воздуха в облаках стадии I значительно превышали соответствующие пульсации для облаков стадии II.

Коэффициент турбулентного перемешивания (коэффициент турбулентности) рассчитывался по модифицированной формуле Ляпина:

$$K_m = \frac{\sigma_w^2 U \overline{\Delta t}}{\sqrt{2\pi} \sigma_u} \quad (11)$$

где  $U$  - средняя скорость фонового потока, а  $\overline{\Delta t}$  - среднее время сохранения знака пульсаций.

На рисунке 5, где приведены эмпирические функции распределения (повторяемость) значений коэффициента турбулентности и сглаживающие их функции для тропических конвективных облаков, находящихся на различных

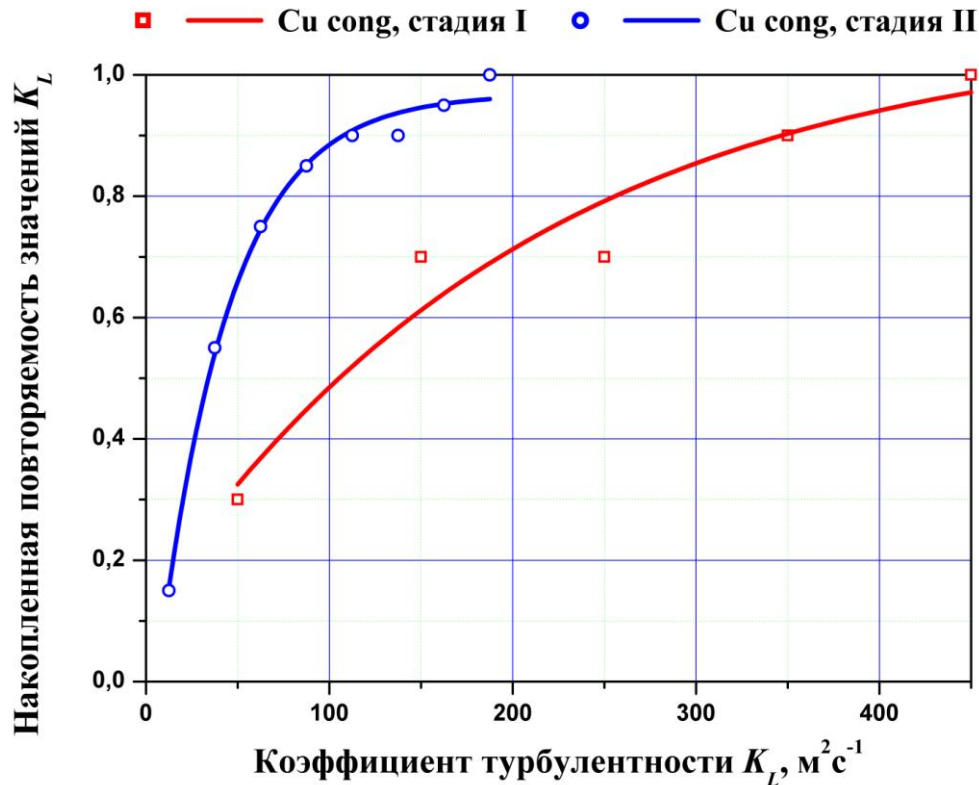


Рисунок 5 - Повторяемость значений коэффициента турбулентности в конвективных облаках тропической зоны стадий I и II

стадиях развития (стадии I и II). Как видно из рисунка, вероятность обнаружить величину коэффициента турбулентности не превышающую заданную величину для облаков стадий I и II отличается весьма существенно (в несколько раз). Так, вероятность обнаружения турбулентной зоны в облаках стадии II со значениями коэффициента турбулентности менее  $100 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$  составляла почти 90%, в то время как в облаках стадии I эта вероятность была всего 50%. Максимальные значения коэффициента турбулентности в облаках стадии II не превышали  $200 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ , в то время как в облаках стадии I могли достигать величин  $800 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ . Существенно различными оказались и средние значения коэффициента турбулентности для облаков стадий I и II. Так, среднее значение (см. таблицу 1) для облаков стадии I составило  $\overline{K_m} = 196 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ , а для облаков стадии II – всего  $63 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ . Таким образом, интенсивность турбулентного

перемешивания в облаках стадии I была почти в четыре раза выше, чем в облаках стадии II. Эти данные чрезвычайно важны для моделирования процессов развития конвективных облаков и планирования активных воздействий на облака, поскольку параметры турбулентного перемешивания существенным образом зависят от стадии развития конвективного облака.

Анализ величин коэффициентов турбулентности, рассчитанных для различных стадий развития Cu позволил оценить применимость широко употребляемой формулы Ричардсона-Обухова для расчета коэффициента турбулентности:

$$K_{RO} = C_{RO} \bar{\epsilon}^{\frac{1}{3}} L_0^{\frac{4}{3}} \quad (12)$$

где  $\bar{\epsilon}$  - средняя скорость диссипации турбулентной энергии, пространственный масштаб  $L_0$  соответствовал характерному размеру турбулентных вихрей, а безразмерный коэффициент, принимаемый обычно как  $C_{RO} = 0,20 \pm 0,09$ , вообще говоря, зависел от формы спектра пульсаций скорости ветра на участке длин волн больших  $L_0$ . По взаимным зависимостям коэффициентов турбулентности  $K_L$  и  $K_{RO}$ , рассчитанным по формулам (11) и (12) соответственно, удалось оценить величины коэффициента  $C_{RO}$  в формуле (12) для различных стадий развития облака. Так, для облаков на начальной стадии развития (стадия I) величина безразмерного коэффициента составила  $C_{RO} = 1,24$ , а для зрелых конвективных ячеек (стадия II) -  $C_{RO} = 0,44$ . Столь существенное (почти в 3 раза) различие в коэффициентах формулы (12) показывает, что при расчетах коэффициента турбулентности необходимо учитывать стадию развития облака.

**Пятая глава** является заключением, в котором изложены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе и приведен список публикаций автора.

## **Основные результаты работы**

В результате анализа данных самолетных исследований облаков тропической зоны над метеополигоном о. Куба был выявлен ряд особенностей

спектральных характеристик турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры, турбулентных потоков тепла и импульса в конвективных облаках и получены универсальные функции описывающих их структуру.

Анализ реализаций пульсаций температуры, полученных при исследованиях конвективных облаков (конвективных ячеек) с борта самолета-метеолаборатории, показал, что воздействие жидко-капельной фракции на датчик температуры приводило к весьма существенным искажениям измеренных значений средней температуры воздуха и ее пульсаций. В связи с необходимостью изучения турбулентных потоков тепла и спектральной структуры полей температуры внутри конвективных облаков и окружающем их пространстве был разработан новый метод введения поправки в температуру и ее пульсации на водность облака. Проведена валидация метода по данным самолетных исследований конвективных облаков тропической зоны и определена величина коэффициента поправки на водность. Было показано, что метод обеспечивает восстановление истинных значений пульсаций температуры в облаке (до температур в облаке выше  $-8^{\circ}\text{C}$ ) и получение непротиворечивых данных о потоках тепла через боковые границы конвективного облака.

Предложенный метод введения поправки на водность облака в температуру и ее пульсации позволил не только определять истинную температуру воздуха в облаке, но и корректно рассчитывать турбулентные потоки тепла в зоне  $\text{Cu}$ . Применение метода спектрального анализа пульсаций скорости ветра и температуры, основанного на вейвлет-преобразовании и разработанного метода введения поправки в температуру на водность облака позволило выявить ряд особенностей развития турбулентности в конвективных облаках тропической зоны (конвективных ячеек или облаков  $\text{Cu cong}$  мощностью до  $8 - 8,5$  км). Анализ кросс-скалограмм и кросс-спектров для потоков тепла показал, что основным механизмом теплообмена между конвективной ячейкой и окружающим ее пространством являлись мезомасштабные вихри с масштабами более  $500$  м. Роль чисто турбулентных движений (с масштабами менее  $500$  м) заключалась в основном в перемешивании внутри облака.

Обнаружено, что спектральные характеристики пульсаций скорости ветра и температуры и потоков тепла и импульса не обладают свойством

автомодельности. Поэтому анализ этих характеристик проводился отдельно для различных стадий развития конвективных ячеек. Показано, что форма и характер спектров пульсаций скорости ветра и температуры и коспектров потоков тепла и импульса существенным образом зависят от стадии развития облака – начальной стадии развития, стадии зрелого облака и стадии диссипации ячейки. Получены универсальные функции, описывающие коспектры потоков тепла и спектры пульсаций скорости ветра и температуры воздуха для различных стадий развития конвективных ячеек, определены управляющие параметры (относительное время жизни ячейки и степень перегрева облака относительно окружающего пространства), параметры универсальных функций, т.е. тем самым предложены основы модели спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках.

Проведено сопоставление спектральных плотностей пульсаций скорости ветра и температуры в тропических конвективных облаках с данными, полученными для затопленных конвективных облаков средней полосы. Показано, что интенсивность пульсаций скорости ветра и температуры в конвективных облаках тропической зоны на всех масштабах существенно превышает интенсивность пульсаций в конвективных облаках средней полосы, развивающихся в условиях окружения их облаками слоистых форм.

Получены эмпирические функции распределения (накопленные повторяемости) среднеквадратических пульсаций скорости ветра и температуры и коэффициента турбулентного перемешивания в зонах конвективных облаков тропической зоны и показано, что эти распределения существенным образом зависят от стадии развития облака. Проведено сопоставление имеющихся в литературе данных о распределении интенсивности пульсаций в конвективных облаках с вновь полученными распределениями и показано, что данные вполне удовлетворительно согласуются. Оценены средние значения среднеквадратических пульсаций скорости ветра и температуры и коэффициента турбулентного перемешивания для различных стадий развития облака.

Оценена применимость формулы Ричардсона-Обухова для расчета коэффициента турбулентного перемешивания в облаках вертикального развития и получены коэффициенты пропорциональности для этой формулы,

которые, как было показано, отличаются для различных стадий развития облаков.

### **Публикации автора (список публикаций)**

Результаты диссертации изложены в следующих публикациях автора:

1. Alexander M. Strunin and Dmitriy N. Zhivoglotov. Estimation of the effect of cloud liquid water content on calculations of the spectral characteristics of horizontal turbulent exchange between a cumulus cloud and ambient atmosphere based on aircraft observations. / Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Clouds and Precipitation, July 31 – August 3, 2012, Leipzig, Germany. - pp. 13.
2. Струнин А.М. Особенности спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков тепла и импульса в зонах конвективных облаков по данным самолетных наблюдений. / Тезисы конференции молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 4-6 июня 2013 г, Обнинск. - сс. 300 – 303.
3. Струнин А.М. Влияние водности облака на расчеты спектральных характеристик полей температуры и турбулентных потоков тепла в зоне кучевых облаков по данным самолетных наблюдений. - / Метеорология и гидрология. – 2013. - № 7. - сс. 53 – 64.
4. Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н., Струнин А.М., Струнин М.А. Достоверность самолетных измерений температуры воздуха и ее пульсаций в облаках с жидко-капельной фракцией и спектральные характеристики турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках. / Сборник научных трудов Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». СКФУ-ВГИ-РГГМУ, Ставрополь, 23 - 26 сентября 2013 г. - сс. 126 – 128.
5. Strunin A.M. and Zhivoglotov D.N. A method to determine true air temperature fluctuations in clouds with liquid water fraction and estimate water droplet effect on the calculations of the spectral structure of turbulent heat fluxes in cumulus clouds based on aircraft data. - / Atmos. Res. - 2014. - V. 138. - No 1. - pp. 98 - 111.
6. Базанин Н.В., Борисов Ю.А., Волков В.В., Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н., Макоско А.А., Струнин А.М., Струнин М.А. Бортовые комплексы самолета-

- лаборатории нового поколения Як-42Д «Росгидромет» для измерения и регистрации навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы. - / Метеорология и Гидрология. – 2014. - № 11. - сс. 83 - 102.
7. Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н., Струнин А.М., Струнин М.А.. Высокочастотный датчик для измерений температуры воздуха и ее пульсаций с борта самолета-лаборатории. - / Мир измерений. - № 9. - сс. 42 - 55.
  8. Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н., Струнин А.М., Струнин М.А. Патент РФ на полезную модель № 148076 «Самолетная метеорологическая система измерения температуры», зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 октября 2014 г., заявка № 2014117933 от 06.05.2014.
  9. Струнин А.М., Струнин М.А. Спектральные характеристики турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках над о. Куба по данным самолетных наблюдений. / Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, г. Нальчик, 7-9 октября 2014 г., ВГИ. - сс. 234 - 243.
  10. Strunin A.M. Spectral characteristics of turbulence in cumulus clouds of tropical zone. / Fifth International Scientific School for Young Scientists "WAVES AND VORTICES IN COMPLEX MEDIA", Moscow, November, 24 – 28, 2014, Ishlinsky Institute for Problems in mechanics of the RAS. - pp. 80 - 83.
  11. Кадыгров Е.Н., Струнин А.М. Особенности спектральных характеристик турбулентности и распределений коэффициента турбулентного перемешивания в тропических конвективных облаках по данным самолетных наблюдений. / Труды II-ой Всероссийской научной конференции «Экология и космос» им. академика К.Я. Кондратьева, Санкт-Петербург, 10 – 11 февраля 2015 г., Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.