

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ  
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральная служба по гидрометеорологии и  
мониторингу окружающей среды

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
«ТАЙФУН»  
(ФГБУ "НПО "Тайфун")

Победы ул., 4, г. Обнинск Калужской обл., 249038  
телефон: (484)3971540, факс: (484)3940910  
e-mail: post@rpatyphoon.ru  
телетайп: 183505 Волна

15.09.2015 № 02-26.8/2015  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

[О направлении отзыва]

Ученому секретарю  
диссертационного совета  
Д 002.096.01 при Институте физики  
атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Л.Д. Краснокутской

119017 г. Москва  
Пыжевский пер., 3

Уважаемая Людмила Дмитриевна!

Направляю отзыв ведущей организации ФГБУ «НПО «Тайфун» о диссертационной работе Струнина Александра Михайловича «Спектральная структура турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках тропической зоны по данным самолетных наблюдений», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Приложение: 1. Отзыв на 10 л. в 2 экз.

Первый заместитель генерального  
директора по научной работе

 В.Н. Иванов

Панова Т.Н.  
(484)3971558

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор  
ФГБУ «НПО «Тайфун»,  
доктор технических наук



В.М. Шершаков  
03 2015 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун».

Диссертация «СПЕКТРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ» представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Диссертация выполнена  
в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
«ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЭРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ».

Соискатель Струнин Александр Михайлович.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Струнина Александра Михайловича, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, посвящена актуальной проблеме физики атмосферы, относящейся к динамике конвективных облаков. Известно, что турбулентность является с одной стороны, важным фактором динамики

облаков различных типов (форм), а с другой – конвективные облака сами за счет мощного выделения тепла продуцируют пульсации скорости ветра и температуры. Поэтому экспериментальные сведения о турбулентности в облаках (и, прежде всего, облаках кучевых форм) очень важны как для изучения физики облаков и осадков, разработки моделей, так и для решения прикладных задач, например, обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов.

Особую сложность в изучении облачной турбулентности представляет нестационарность происходящих процессов. Тем не менее, соискателю удалось преодолеть связанные с этим трудности и получить данные о закономерностях спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках. Это восполняет существенный пробел в области исследований облачной турбулентности, поэтому диссертационная работа А.М. Струнина представляется **актуальной**.

Тема диссертации соответствует специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы, как области науки, включающей экспериментальное и теоретическое изучение процессов, происходящих в земной атмосфере и гидросфере.

Область диссертационного исследования соответствует пункту паспорта специальности: 1. «Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли».

Для решения указанной актуальной проблемы автором диссертации выполнен анализ самолетных данных о турбулентности, полученных в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета во время комплексных экспериментов по исследованию тропических конвективных облаков на метеорологическом полигоне на о. Куба.

Методы исследования, использованные автором, основаны на вейвлет-анализе реализаций пульсаций скорости ветра и температуры воздуха и построении спектральных характеристик – скалограмм, спектров турбулентности и коспектров потоков тепла. Для решения поставленной в

диссертации задачи – выявления особенностей спектральных характеристик турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры, турбулентных потоков тепла и импульса в конвективных облаках тропической зоны и получения эмпирических функций, описывающих спектральную структуру турбулентности в этих облаках, соискатель разработал метод учета влияния водности облака на самолетный датчик температуры, провел обработку и анализ самолетных данных о турбулентности в тропических конвективных облаках над о. Куба с применением вейвлет-анализа, рассчитал спектральные характеристики (спектральные плотности пульсаций, спектры и коспектры) турбулентности. Разделение данных о турбулентности, полученных для облаков, находящихся на различных фазах развития, позволило автору построить универсальные спектральные характеристики турбулентности.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования. Указаны степень новизны результатов исследования, их научная и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и оценена степень достоверности результатов, описан личный вклад автора в работу и приведен список публикаций автора по теме диссертации.

Оценка научной новизны, научная и практическая значимость работы соответствуют паспорту специальности.

Проведен анализ состояния вопроса на основе достаточного полного обзора имеющихся в литературе сведений о турбулентности и воздушных течениях в облаках. Обзор иллюстрирован, приведены рисунки, заимствованные из различных источников, представлены также численные данные, характеризующие турбулентность в кучевых облаках. Отдельное внимание уделено классификации конвективных облаков и фаз их развития.

В обзорной части диссертации изложены также и основные методы измерения турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры воздуха с борта самолета-лаборатории и способы получения спектральных характеристик турбулентности. Отмечается, что до сих пор не решена задача измерения температуры воздуха в облаках с жидко-капельной фракцией.

Проводится обзор методов расчета спектральных характеристик турбулентности с помощью вейвлет-преобразования и показывается, что наиболее приемлемым средством для получения спектров и коспектров неоднородной турбулентности является анализ на основе вейвлета Морле.

**Во второй главе** сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

**В третьей главе** автор приводит описание самолетного эксперимента по исследованию облаков вертикального развития над о. Куба в августе – октябре 2007 г. на метеополигоне в районе г. Камагуэй, данные которого были использованы в диссертационной работе. Приводится описание используемой аппаратуры и применяемых методов расчета турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры. Отмечается, что изучались облака на различных стадиях развития, которые классифицировались как *Cu cong* различной мощности и диссипирующие ячейки – так называемых фидерные облака. Особенно важно то, что самолетный эксперимент сопровождался наземными радиолокационными измерениями.

**В четвертой главе** приводятся результаты анализа данных о турбулентности и турбулентных потоках в облаках конвективного развития тропической зоны. Предварительно описаны методы расчета и представления спектральных характеристик турбулентности в зоне конвективных облаков и изложена процедура применения вейвлет-анализа на основе вейвлета Морле.

Важным разделом главы является описание метода определения температуры воздуха в облаках с жидко-капельной фракцией, оценки его точности и валидация метода. Показано, что поправка в температуру на водность облака зависит от степени нагрева воздуха в датчике за счет торможения потока и величины мгновенного значения жидко-капельной водности. Сделана валидация величины коэффициента, определяющего поправку, по данным самолетных измерений в зоне конвективного облака.

В этой же главе представлены результаты анализа данных о

спектральной структуре турбулентности в конвективных облаках, причем, ввиду того, что конвективные облака существенным образом искажают структуру полей ветра и температуры автор рассматривает само облако и окружающее его пространство как единую динамическую зону. Турбулентность в зоне кучевого облака обладает явно выраженными свойствами неоднородности, нестационарности, поэтому автор систематизировал данные о турбулентности по фазам развития облаков – начальная стадия развития, зрелое облако и стадия диссипации облака. Критерием для систематизации данных послужили данные наземных радиолокаторов, позволяющие оценить время жизни исследуемой конвективной ячейки. Однако более удобным управляющим параметром оказалась величина перегрева облака относительно окружающего пространства. В результате автору удалось получить универсальные функции спектральных характеристик – спектров пульсаций и коспектров потоков тепла. Это может служить основой для создания эмпирической модели турбулентности в облаках вертикального развития. Универсальные функции представлены автором как в графическом, так и аналитическом виде, что позволяет использовать их в различных приложениях.

В этой же главе соискатель приводит полученные им конкретные численные данные, полезные для приложений. Так, приводятся распределения (повторяемости) пульсаций скорости ветра и температуры, коэффициента турбулентного обмена в зонах конвективных облаков. Автор также проводит анализ применимости известной формулы Ричардсона-Обухова для расчета коэффициента турбулентности и показывает, что коэффициенты пропорциональности в этой формуле существенно зависят от формы спектров на низких частотах, следовательно, и от фазы развития облака.

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

Основные результаты можно сформулировать следующим образом.

Разработан метод введения поправки в температуру и ее пульсации на водность облака и проведена валидация метода по данным самолетных исследований конвективных облаков тропической зоны. Показано, что метод обеспечивает восстановление истинных значений пульсаций температуры в облаке (до температур в облаке выше  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и получение непротиворечивых данных о потоках тепла через боковые границы конвективного облака.

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 неизвестных ранее особенностей развития турбулентности в конвективных облаках тропической зоны (конвективных ячеек или облаков *Cu cong* мощностью до  $8 - 8,5$  км). 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.

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 удовлетворительно согласуются, т.е. проведена оценка достоверности полученных результатов. 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.

Сформулированные в заключении **основные результаты и выводы** в полной мере отражают содержание диссертационной работы.

**Положения, выносимые на защиту**, представляют значительный научный вклад для понимания физики конвективных облаков, развития методов моделирования облаков, построения эмпирических моделей облачной турбулентности.

**Научная новизна** работы не вызывает сомнений и состоит в том, что в результате проведенных исследований:

- 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.

Полученные результаты углубляют понимание процессов, происходящих в конвективных облаках. **Достоверность результатов** подтверждена сопоставлением вновь полученных данных с результатами исследований турбулентности в конвективных облаках тропической зоны и средней полосы.

**Апробация работы** проведена в достаточном объеме, результаты исследований докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, семинарах и заседаниях Ученого совета ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория». Основной материал диссертации отражен в научных публикациях диссертанта. Общее число работ 11, из них 2 работы опубликованы в журналах из перечня ВАК, одна работа опубликована в журнале из списка Scopus, получен патент на полезную модель. Таким образом, требования, предъявляемые к диссертационным исследованиям, соблюдены.

Результаты работы и её апробация достаточно полно освещены в автореферате и в приведенных публикациях автора. **Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации.

**Научная и практическая значимость результатов**, полученных в работе, заключается в том, что данные о характеристиках турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры и потоков тепла и импульса в облаках вертикального развития могут быть использованы для изучения и моделирования физических процессов образования и развития облаков и осадков.

Метод введения поправки на водность облака при самолетных наблюдениях имеет важное прикладное значение, поскольку 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 положены в основу эмпирической модели турбулентности в конвективных облаках и в задачах по компьютерному моделированию возникновения и развития облаков.

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

Следует отметить некоторые недостатки диссертационной работы.

Текст диссертации и автореферата не всегда достаточно тщательно отредактирован.

Не рассмотрено возможное влияние спектра капель облака на поправку в температуру на водность.

Указанные недостатки не умаляют ценности полученных в диссертационной работе результатов и выводов.

Рассматриваемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение в области физики атмосферы. Она обобщает самостоятельные исследования автора и представляет собой законченный научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему, и содержит новые научные результаты.

На основании вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа и автореферат удовлетворяют всем требованиям пунктов 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, в редакции от 30.07.2014 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Струнин Александр Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Заключение принято на заседании секции №1 «Физика атмосферы и геофизический мониторинг» Ученого совета ФГБУ «НПО «Тайфун».

Присутствовало на заседании 23 чел. Результаты голосования: «за» - 23 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 2015-6 от 15 сентября 2015 г.

Отзыв подготовил:

Зав. лаб. ФГБУ «НПО «Тайфун» доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

  
\_\_\_\_\_ Михаил Александрович Новицкий

Адрес: Россия, 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4  
Тел. (484) 397-19-41. E-mail: [novitsky@rpatyphoon.ru](mailto:novitsky@rpatyphoon.ru)

Председатель секции № 1 «Физика атмосферы и геофизический мониторинг» Ученого совета ФГБУ «НПО «Тайфун»

Кандидат физико-математических наук по специальности 25.00.29. доцент

  
\_\_\_\_\_ Владимир Николаевич Иванов

Адрес: Россия, 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4  
Тел. (484) 397-15-19 E-mail: [vivanov@rpatyphoon.ru](mailto:vivanov@rpatyphoon.ru)

Ученый секретарь секции № 1 «Физика атмосферы и геофизический мониторинг» Ученого совета ФГБУ «НПО «Тайфун»

Кандидат физико-математических наук по специальности 25.00.29

  
\_\_\_\_\_ Валентина Борисовна Шушкова

Адрес: Россия, 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4  
Тел. (484) 397-19-78 E-mail: [val\\_sh@rpatyphoon.ru](mailto:val_sh@rpatyphoon.ru)