

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

доктора технических наук Кадыгрова Евгения Николаевича

на диссертацию на соискание ученой степени доктора

физико-математических наук

Ермакова Дмитрия Михайловича на тему:

**«Спутниковое радиотепловидение мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов»,**

по специальности 01.04.03-«радиофизика»

Диссертационная работа Ермакова Д.М. посвящена построению и практической реализации единой методики обработки и анализа регистрируемых с искусственных спутников Земли радиотепловых полей и восстанавливаемых на этой основе геофизических параметров системы океан-атмосфера. При этом используется замкнутая относительно этих данных вычислительная схема, обеспечивающая восстановление динамики наблюдаемых процессов с высокой пространственно-временной детализацией и возможность краткосрочного прогноза их развития. Кроме того, проведено детальное исследование геофизических параметров на основе построения временных значимых характеристик их энергетического баланса (в частности, адвекции скрытого тепла).

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

Фактически с момента получения первых спутниковых данных с приборов, обеспечивающих возможность проведения радиотеплового мониторинга системы океан-атмосфера, пионерская роль в создании которых принадлежит сотрудникам ИРЭ РАН, возникли задачи восстановления динамики и эволюции различных атмосферных процессов. Они были выделены в отдельный класс актуальных и проблемных исследований. В силу особенностей распространения радиоволн в атмосфере именно спутниковый радиомониторинг способен проводить круглосуточные измерения основных геофизических параметров системы океан-атмосфера и поставлять ценнейшую уникальную информацию о зарождении и эволюции атмосферных мезомасштабных, синоптических и климатически значимых процессов. Извлечение максимально полной информации о динамике и энергетике атмосферных процессов непосредственно из данных радиотепловых спутниковых наблюдений сохраняет высокую актуальность. При этом особо актуальной является задача разработки и реализации единого подхода к обработке и анализу спутниковых радиотепловых данных, позволяющего исследовать динамические аспекты разномасштабных атмосферных процессов, давать краткосрочный анализ и прогноз их развития, а также получать численные, физически значимые характеристики их энергетического баланса. Именно решению этой актуальной задачи посвящена данная диссертационная работа.

### **2. Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и списка использованных источников из 265 наименований. Объем диссертации составляет 288 страниц, включая 67 рисунков и 9 таблиц.

**Во введении** отмечена актуальность темы диссертационной работы; степень разработанности темы исследования; основная цель работы; задачи, которые потребовались решить автору; методология и методы исследования; объект исследования; научная новизна; предмет защиты; положения, выносимые на защиту; достоверность представленных результатов; научная и практическая значимость; апробация работы; личный вклад автора; соответствие диссертации паспорту специальности; публикации по теме диссертации; структура и объем диссертации; благодарности научному консультанту и со-авторам публикаций.

**Первая глава** диссертации носит вводный характер. В ней представлено спутниковое радиотепловое зондирование мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов как обратная задача дистанционного зондирования Земли радиофизическими методами. Показано, что объектом исследований в данной работе являются мезомасштабные и синоптические процессы. При этом яркими примерами первых являются тропические циклоны, а вторых – так называемые «атмосферные реки». Более конкретный предмет исследования – параметры и закономерности динамики и эволюции объектов исследования, впервые описываемые массивами и временными рядами физических характеристик (скоростей адвекции, потоков скрытого тепла и другими) с высокой пространственно-временной детализацией на основе замкнутой схемы обработки их радиотепловых изображений, полученных с помощью радиотепловых измерений. В рамках единой методологии исследований охвачен диапазон горизонтальных масштабов  $10^2$ - $10^4$  км. Отмечено, что важным фактором является тщательный количественный анализ адвекции водяного пара в тропосфере, при этом в последние годы информация о влагосодержании тропосферы стала весьма доступна благодаря наличию данных с различных современных микроволновых спутниковых радиометров (AMSU-B, SSMIS, AMSR-E, МТВЗА-ГЯ и других, краткий обзор истории создания и развития подобных приборов сделан во втором параграфе этой главы). В заключительном параграфе этой главы проводится общая постановка обратной задачи анализа динамики тропосферы по периодически измеряемым полям ее геофизических параметров.

**Вторую главу** работы автор посвятил подробному рассмотрению полученного в диссертации решения, результатом которого являются не только восстановленные кинематические характеристики движения воздушных масс (скорости адвекции водяного пара в тропосфере), но и важные энергетические характеристики: интегральные горизонтальные потоки потенциальной энергии фазовых переходов атмосферной влаги через заданные границы. Данная глава состоит из пяти параграфов. В первом параграфе сформулирована обратная задача «анализа оптического потока» и «оценки и компенсации движения». Приводится обсуждение методов извлечения информации о движении по последовательности наблюдений за определенной областью пространства. Сделан краткий обзор применения алгоритмов анализа оптического потока в различных задачах дистанционного зондирования, а также основания для его использования при анализе интегральных геофизических полей атмосферы в рамках спутникового радиотепловидения. Второй параграф этой главы описывает синтез базовой вычислительной схемы, спецификой которой является необходимость построения на заданной регулярной координатной сетке опорных полей геофизических параметров, не содержащих так называемых «лакун» – то есть областей, не покрытых наблюдениями, что характерно для данных спутников с полярной орбитой. Для заполнения лакун предложена интерполяционная методика, названная «сшивкой лакун». Приводятся примеры ликвидации лакун в спутниковых данных путем использования информации разных приборов с нескольких спутников (например, прибора SSMIS на спутнике DMSP F17 и прибора WindSat на спутнике Coriolis). В третьем параграфе исследуется вопрос

результатирующей точности синтезирующей схемы пространственно-временной интерполяции информации со спутников. А именно, глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, построенные на регулярной сетке координат, были оптимально совмещены по времени с аналогичными глобальными полями, построенными независимо на основе серии измерений, полученных другими спутниковыми приборами. В четвертом параграфе этой главы представлено возможное итерационное расширение базовой схемы пространственно-временной интерполяции геофизических параметров атмосферных полей, нацеленное на использование максимального объема доступных данных. В заключительном параграфе сделан анализ новых возможностей исследования атмосферных процессов, предоставляемых реализованной схемой пространственно-временной интерполяции. В частности, это возможность расчета мощности адвективного потока скрытого тепла через произвольно задаваемые границы.

**Темой третьей главы,** которая также состоит из пяти параграфов, является демонстрация возможностей спутникового радиотепловидения для анализа динамических процессов эволюции тропических циклонов в полях геофизических параметров системы океан-атмосфера. Первый параграф посвящен краткому обзору традиционно используемых характеристик интенсивности тропического циклона, а также основных путей исследования источников энергии для его развития и перехода в стадию урагана. Во втором параграфе дана общая характеристика использованных радиотепловых спутниковых данных и методика их обработки, основанная на описанных выше алгоритмах спутникового радиотепловидения. Основная идея состоит в построении синхронных временных рядов максимальной устойчивой скорости горизонтального ветра в стене тропического циклона, и мощности адвективного потока скрытого тепла через охватывающие циклон круговые контуры, с дальнейшим совместным анализом полученных рядов. В третьем параграфе приводятся результаты анализа эволюции семи тропических циклонов, достигших зрелой фазы в августе 2000 г. В качестве примера приводится анализ эволюции тропического урагана Alberto (3-23 августа 2000 г.). В четвертом параграфе с помощью алгоритмов спутникового радиотепловидения в дополнение к расчетам конвергентных и дивергентных потоков скрытого тепла через окружающие тропический циклон контуры выполнено пространственно-временное совмещение полей интегрального влагосодержания атмосферы и температуры поверхности океана (ТПО). При этом показано, что ТПО не играет определяющего значения при эволюции зрелых форм тропического циклона. Рассмотрены также примеры с супертайфуном Haiyan и тропическим штормом Podul (2013 г.). Пятый параграф посвящен анализу системы взаимодействующих тайфунов-близнецов Goni и Atsani (2015 г.). Введением сложных контуров, охватывающих систему двух тропических циклонов, автору удалось показать связь общей интенсивности системы с величиной и направлением формируемых ей адвективных потоков скрытого тепла.

**Четвертая глава,** состоящая из трех параграфов, описывает возможности спутникового радиотепловидения для изучения синоптических атмосферных процессов на примере так называемых «атмосферных рек» (АР – нитевидные структуры в поле атмосферного водяного пара, обеспечивающие быстрый перенос влаги из тропиков в средние и высокие широты). АР существенно влияют на меридиональный транспорт атмосферного скрытого тепла, а также являются причиной значительного числа экстремальных явлений в прибрежных районах. В первом параграфе описаны возможности спутникового радиотепловидения по исследованию атмосферных рек. Во втором параграфе описан новый алгоритм автоматического выявления АР на основе использования интерполированных полей интегрального влагосодержания атмосферы. Заключительный параграф этой главы более объемный, в нем продемонстрированы возможности спутникового радиотепловидения для вычисления потоков скрытого тепла,

формирующихся в AP, и делается сравнение с фоновыми потоками. Показаны примеры устранения лакун в изображениях интегрального влагосодержания, что существенно улучшает автоматическое детектирование протяженных атмосферных особенностей.

**Пятая глава** посвящена использованию возможностей применения данных спутникового радиотепловидения для анализа глобальной атмосферной циркуляции. Рассмотрены различные примеры подобного анализа и приводятся положительные результаты сравнения полученных данных с известными данными о средней зональной циркуляции. Отмечено, что средний меридиональный перенос наиболее ярко выражен в умеренных широтах вблизи западных границ континентов двух полушарий. Детализация характеристик атмосферной циркуляции проводится автором путем расчета потоков скрытого тепла через различные семейства границ. Существенной чертой средней меридиональной адвекции является южный перенос над северо-востоком Тихого океана и над Северной Атлантикой, причем этот компонент циркуляции является одним из главных факторов, формирующих климат Арктики. Приводятся также примеры исследования структуры меридиональных потоков скрытого тепла как функции широты. Показано, что общая картина более симметрична относительно экватора в «зимний» сезон: потоки тепла до  $30^{\circ}$  северной широты отрицательны (направлены на юг), а потоки в южной тропической зоне направлены на север, в обоих случаях – к экватору, формируя внутритропическую зону конвергенции. В целом результаты, изложенные автором в этой главе, представляют большой практический интерес для специалистов по атмосферной циркуляции и исследованию климата.

**Шестая глава** посвящена важному практическому достижению автора диссертации, доступному широкому кругу специалистов, использующих данные спутниковых приборов, основанных на радиофизических методах зондирования. А именно – описанию созданного под его руководством и при непосредственном участии геопортала спутникового радиотепловидения. Геопортал позволяет широкому научному сообществу получить доступ к результатам расчетов динамики атмосферных полей за длительные интервалы наблюдений спутниковыми приборами радиотепловидения. Глава состоит из трех параграфов. В первом сформулирована общая концепция построения геопортала на принципах виртуальной интеграции распределенных источников спутниковой информации. Второй параграф дает общее представление о предоставляемых геопорталом типов данных и сервисов для удаленной работы. Приведена схема базовой архитектуры геопортала, поясняющая концепцию генерации продуктов обработки в интерактивном режиме по запросу пользователя. Геопортал оснащен базовыми сетевыми сервисами, соответствующими стандартным инструментам предварительного просмотра, поиска и заказа данных. Режим визуализации позволяет выполнить предварительный экспресс-анализ данных, отбор временных интервалов, зон интереса, выбор и локализацию конкретных объектов исследования. В третьем параграфе рассмотрен инструмент удаленной работы с данными: ИКАР (Интерактивный Калькулятор для Атмосферных Расчетов). В основу его было положено предположение о том, что все пространственные данные имеют привязку по времени и могут быть интерполированы на общую сетку.

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

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

Научная новизна состоит в следующем:

1. Автором впервые предложена и программно реализована замкнутая схема интерполяционной обработки данных спутникового радиотепловидения и получаемых на этой основе полей геофизических параметров системы океан-

атмосфера, получаемых с высоким пространственным и временным разрешением, а также восстановление их промежуточных состояний, не охваченных данными измерений («сшивки лакун» в данных полярных спутников).

2. Впервые на основе вычисленных по данным спутниковых радиофизических измерений потоков атмосферного скрытого тепла показана связь между конвергентным (дивергентным) режимом адвекции скрытого тепла и интенсификацией (диссипацией) тропических циклонов.
3. Впервые с помощью созданного отечественного геопортала спутникового радиотепловидения реализован открытый доступ к глобальным полям основных геофизических параметров (интегральное влагосодержание, водозапас облаков, скорость приводного ветра) и векторному полю адвекции водяного пара, а также интерактивный инструмент их интерполяции на произвольный момент времени.
4. Впервые на основе предложенных автором алгоритмов по замкнутой схеме обработки спутниковых радиотепловых данных проведен анализ нитевидной структуры атмосферной циркуляции в целях исследования так называемых «атмосферных рек».
5. Впервые достаточно детально восстановлена картина глобальной атмосферной циркуляции на основе данных спутникового радиотепловидения для определенных временных интервалов.
6. Предложена и реализована в замкнутом виде относительно спутниковых радиотепловых данных оригинальная методика расчета адвективных потоков атмосферного скрытого тепла.

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

Все положения представленной диссертационной работы обоснованы, достоверны, обеспечены применением корректного математического аппарата, соответствуют общефизическим представлениям о динамике и эволюции исследуемых процессов, прошли достаточную апробацию как в виде докладов на представительных конференциях и симпозиумах, так и достаточным числом публикаций в реферируемых научных журналах, и исключают двоякую интерпретацию.

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

Созданная в процессе выполнения диссертационной работы методика восстановления динамики полей геофизических параметров системы океан-атмосфера дает непосредственную возможность для качественного и количественного экспресс-анализа эволюции важнейших атмосферных процессов. Расчеты адвективных потоков скрытого тепла могут быть использованы для дополнения и уточнения теоретических представлений и дальнейшего развития оперативных моделей эволюции быстроразвивающихся атмосферных процессов, в том числе и катастрофического характера. Под руководством и при непосредственном участии автора создан и развивается геопортал спутникового радиотепловидения, который представляет большой практический интерес для пользователей – метеорологов, климатологов, радиофизиков. С формальной точки зрения основные результаты, представленные Д.М. Ермаковым в диссертации, получены в рамках исполнения государственных заданий ФАНО РФ по темам «ЦОХКИ» и «ЦОХКИ-1» и включены в 12 научно-технических отчетов. Ряд результатов получен в ходе работ по проектам РФФИ, в том числе выполненному в 2015-2017 гг. под руководством автора (грант РФФИ № 15-07-04422). Потенциальными потребителями результатов диссертационной работы являются различные организации Российской Академии наук, Росгидромета, Министерства образования и науки РФ, Министерства по чрезвычайным ситуациям, других ведомств.

## **6. Оформление диссертации**

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

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

По теме диссертации опубликованы в 23 работах, проиндексированных в РИНЦ: 17 статей в изданиях из перечня ВАК, 2-в других рецензируемых научных изданиях, 3-в материалах международных и 1-Всероссийской научной конференции. Общее число цитирований работ автора в системе РИНЦ – 291 (на момент завершения диссертации). Опубликованные автором работы достаточно полно отражают материал, изложенный в диссертации.

## **8. Замечания по диссертации**

В качестве замечания ко всему тексту работы следует отметить:

1. Присутствуют немногочисленные опечатки;
2. Ряд текстовых предложений очень громоздки, что усложняет понимание их сути.
3. Автореферат напечатан излишне мелким шрифтом.
4. Не очень понятно, что вкладывает автор в понятие «нижняя атмосфера» в тексте диссертации? Это атмосферный пограничный слой?
5. Уровень работы соответствует международному, желательно автору опубликовать результаты своей работы в таких международных журналах, как «Geophysical Research», «IEEE Geoscience and Remote Sensing», «Radio Science» и т.п.

Замечания к отдельным главам диссертации:

1. В главе 1 описаны возможности современных отечественных спутниковых приборов, но их данные не используются для иллюстрации разработанного подхода (г.2) и не привлекались для анализа атмосферных процессов (гг.3-5).
2. Анализируются двумерные геофизические поля, а как насчет трехмерных?
3. Нет сравнений данных спутниковых приборов, основанных на использовании радиофизических методов, с приборами, работающими в других диапазонах волн: оптических и ИК спутниковых сканеров.

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

## **9. Оценка работы**

Представленная работа имеет внутреннее единство, хорошо оформлена, выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. Диссертационную работу отмечает ясность физических постановок, хорошая структурированность результатов, их детальный анализ и графическое представление. Совокупность изложенных в ней результатов можно квалифицировать как научное достижение, связанное с решением крупной научной задачи в рамках радиофизических исследований Земли из космоса – восстановления динамических и энергетических адвективных характеристик мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов. Работу можно оценивать как решение задачи, имеющей существенное значение для задач паспорта специальности 01.04.03 по номенклатуре ВАК РФ.

## Заключение

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.03-«радиофизика» под номером 5 в части «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание системы дистанционного мониторинга геосферы, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы», а также критериям пункта 2 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемых Высшей аттестационной комиссией РФ к докторским диссертациям. Соответственно соискатель — Ермаков Дмитрий Михайлович, безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03-«радиофизика».

Официальный оппонент

Кадыгров Евгений Николаевич,  
доктор технических наук (специальность 05.12.14 – «радиолокация и радионавигация»),  
доцент,  
главный научный сотрудник Лаборатории дистанционного зондирования Федерального бюджетного государственного учреждения «Центральная аэрологическая обсерватория»  
Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
Адрес места работы: 141700 Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3.

Рабочий телефон 8-495-5799455.

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

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

21 января 2019 г.

/Е.Н. Кадыгров/

Подпись Е.Н. Кадыгрова заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «ЦАО»

Кандидат географических наук



/ Безрукова Н.А./