

На правах рукописи



Ермаков Дмитрий Михайлович

**СПУТНИКОВОЕ РАДИОТЕПЛОВИДЕНИЕ
МЕЗОМАСШТАБНЫХ И СИНОПТИЧЕСКИХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Фрязино-2018

Работа выполнена во Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Научный консультант:

Шарков Евгений Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Гайкович Константин Павлович,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Кадыгров Евгений Николаевич,

доктор технических наук, главный научный сотрудник лаб. дистанционного зондирования Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральная аэрологическая обсерватория».

Нерушев Александр Федорович,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Института экспериментальной метеорологии Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «22» марта 2019 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Ermakov/index.html> ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Автореферат разослан

« » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Копылов
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Задачи восстановления и анализа динамики и эволюции атмосферных процессов на основе данных спутникового радиотеплового мониторинга были выделены в особый класс актуальных и проблемных исследований практически сразу после публикации результатов первых спутниковых экспериментов по измерению собственного радиотеплового излучения Земли. Необходимость обеспечить приемлемое пространственное разрешение (порядка 10 км) вынуждает проводить спутниковые измерения с низких орбит. В итоге, несмотря на возможность круглосуточных и всепогодных наблюдений, метеорологический спутник формирует за сутки лишь два глобальных (многоканальных) радиотепловых образа Земли, содержащих периодические «лакуны» (пропуски данных) в низких широтах. При этом орбитальная скорость спутника такова, что объект с характерными горизонтальными размерами порядка 1000 км наблюдается в течение всего около двух минут.

В этих условиях сложилась преимущественная тенденция к интерпретации спутниковой информации как набора независимых мгновенных точечных измерений. Такой подход оказался чрезвычайно продуктивным для надежного восстановления ряда геофизических параметров системы океан-атмосфера – в основном, интегральных по высоте, либо характеризующих границу раздела атмосферы и океана. Среди них лишь скорость приводного ветра может непосредственно рассматриваться как (далеко не полная) характеристика динамики системы океан-атмосфера. Исследование аспектов энергетического баланса атмосферных процессов ограничено, главным образом, оценками вертикальных потоков тепла на основе полуэмпирических соотношений и (или) с использованием данных дополнительных измерений. Методики оценки адвекции тепла в атмосферных системах носят еще более косвенный характер и не получили широкого распространения. Между тем, именно спутниковый радиотепловой мониторинг Земли, благодаря возможности круглосуточного измерения основных геофизических параметров системы океан-атмосфера, способен обеспечить исследователей ценнейшей и уникальной информацией о зарождении и эволюции атмосферных мезомасштабных, синоптических и климатически значимых процессов.

По указанным причинам высокую актуальность приобрела 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, получать численные, физически значимые характеристики их энергетического баланса.

Степень разработанности темы. Несмотря на отмеченную выше тенденцию, долгую историю имеют и исследования, нацеленные на поиск и установление пространственно-

временных связей в измеряемых со спутника собственных радиотепловых полях Земли. Трудности начального этапа были обусловлены в первую очередь сравнительно малыми объемами экспериментальных данных и самой методикой трассовых измерений, реализованных в пионерских проектах на спутниках «Космос-243» (1968) и «Космос-384» (1970) [Башаринов, Гурвич, Егоров, 1974; Гурвич, Кутуза, 2010]. Существенное повышение информативности спутникового радиотеплового мониторинга было достигнуто в последующие десятилетия [Шарков, 2014; Кутуза, Данилычев, Яковлев, 2016]. Особо следует отметить уникальную программу спутниковых исследований DMSP (США), реализующую долговременную серию высокостабильных глобальных радиотепловых измерений геофизических полей Земли.

Возросшая информативность данных спутниковых радиотепловых измерений привела к их активному использованию для задания граничных условий в различного рода численных моделях, предлагающих описание процессов в системе океан-атмосфера на базе общих законов гидродинамики, термодинамики, биогеохимии и т.д. Большинство таких моделей характеризует высокая вычислительная сложность. Расчеты по моделям глобальной циркуляции осуществляются на достаточно грубой координатной сетке [Дымников и др., 2005] с шагом по горизонтали порядка единиц градусов. Анализ региональных синоптических процессов и вариаций климата допускает расчеты на более мелких масштабах, однако, зачастую требует в качестве граничных условий прогнозов и оценок по глобальным моделям [Лыкосов и др., 2012]. Применение крупномасштабных аппроксимаций зачастую приводит к огрублению и потере информативности исходных спутниковых данных. При всей продуктивности этого подхода нельзя не отметить наличие в нем определенного методологического противоречия с активно развиваемыми концепциями зарождения и эволюции крупных атмосферных систем из мелкомасштабных неустойчивостей. Выяснение вопроса о точности крупномасштабного модельного описания сложной совокупности атмосферных процессов требует привлечения больших объемов данных реальных наблюдений.

По этой причине извлечение максимально полной информации о динамике и энергетике атмосферных процессов непосредственно из данных спутникового мониторинга Земли сохраняет высокую актуальность [Gaikovich, 1994; Kadygrov, Shur, Viazankin, 2003]. Прогресс развиваемых в этом направлении методов в значительной степени определяется как объемом и качеством доступной спутниковой информации, так и ростом возможностей вычислительных средств. После 2010 г. независимо возникли и продолжают развиваться несколько подходов, имеющих концептуальное сходство, в том числе представленный в диссертации. Некоторые из них реализованы для данных наблюдений в видимом и ИК диапазонах с геостационарных орбит и используют преимущества полного покрытия измерениями значительной части Земли с высокой периодичностью и при достаточном пространственном разрешении [Velden et al., 1997;

Nerushev, Kramchaninova, 2011]. Однако они позволяют исследовать главным образом эволюцию облачных систем и движения в верхней части тропосферы. Использование радиотепловых данных критически важно для реконструкции полной картины динамики и энергетики тропосферных процессов, но требует учета специфики спутниковых измерений с низких орбит. Один из наиболее известных из мировой литературы методов «адвективного смешивания», англ. *advective blending* [Wimmers, Velden, 2011], частично преодолевает возникающие трудности широким привлечением сторонних данных моделирования атмосферной динамики, что резко снижает его значимость как инструмента независимого исследования. Подход, развитый в диссертации, свободен от указанного недостатка и обеспечивает извлечение информации о динамике и энергетике наблюдаемых атмосферных процессов непосредственно из данных спутникового радиотеплового мониторинга.

Основная цель работы состояла в построении и практической реализации единой методики обработки и анализа регистрируемых со спутников радиотепловых полей и (или) полей восстанавливаемых геофизических параметров системы океан-атмосфера, использующей замкнутую относительно этих данных вычислительную схему и обеспечивающей восстановление динамики наблюдаемых процессов с высокой пространственно-временной детализацией, возможность краткосрочного прогноза их развития и детальное исследование аспектов их эволюции на основе построения временных рядов физически значимых характеристик их энергетического баланса (в частности, адвекции скрытого тепла). Для достижения этой цели потребовалось решить следующие **задачи**:

- проанализировать проблему восстановления динамики мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов как специфический класс обратных задач спутникового дистанционного зондирования Земли в радиотепловом диапазоне;
- сформулировать общий подход и синтезировать вычислительную схему восстановления атмосферной динамики на базе пространственно-временной интерполяции данных с использованием как представлений о формировании регистрируемых со спутников радиотепловых полей системы океан-атмосфера, так и идей и алгоритмов из области технического зрения, адаптированных к специфике задачи;
- выполнить анализ точности предложенной расчетной схемы путем обработки и сопоставления больших массивов спутниковой информации;
- на базе реализованной расчетной схемы развить подход к совместной обработке мультисенсорной спутниковой информации как для дополнительного улучшения пространственно-временной детализации анализа путем объединения данных наиболее современных сканирующих радиометров-зондировщиков, так и для привлечения

разнородных данных к исследованию различных аспектов эволюции и энергетического баланса наблюдаемых атмосферных систем;

- на основе развитого подхода разработать и реализовать универсальную методику детального анализа эволюции разномасштабных атмосферных процессов в терминах характеристик их энергетического баланса (в частности, адвекции скрытого тепла через семейства границ, формируемых под конкретные условия задачи);
- применить реализованную методику для выявления роли адвекции скрытого тепла при эволюции тропических циклонов как одного из важнейших типов атмосферных процессов с характерным горизонтальным масштабом от сотен до тысяч км, временем жизни от единиц до десятков суток и возможностью быстрых трансформаций больших объемов тепловой энергии в механическую, что требует выполнения дательных вычислений на расчетной сетке с пространственным шагом до $0,125^\circ - 0,2^\circ$ и шагом по времени до 1,5 часов;
- применить реализованную методику анализа и накопленные результаты массовой обработки спутниковой информации для исследования аспектов меридионального и зонального переноса скрытого тепла над акваториями Мирового океана на синоптических масштабах, в частности, связанного с формированием так называемых «атмосферных рек»;
- организовать и провести массовую обработку данных радиотеплового спутникового мониторинга за более чем десятилетний период непрерывных наблюдений для детального анализа синоптических и климатически значимых процессов на планетарных масштабах, тем самым, в частности, обеспечить уникальную возможность независимой проверки ряда теоретических оценок, получаемых на основе циркуляционных моделей.

Методология и методы исследования. Одна из важных задач радиотепловидения в целом – формирование детальных радиотепловых образов наблюдаемых объектов, т.е. повышение пространственного разрешения измерений за счет использования информационной избыточности массива данных, полученных в близких точках пространства и (или) в близкие моменты времени. Развита в работе методика обработки и анализа спутниковых радиотепловых данных также существенным образом использует их информационную избыточность, но прежде всего – для извлечения информации о динамике наблюдаемых процессов из хронологической последовательности измерений. С этой целью применен известный в области технического зрения метод оценки и компенсации движения, значительно адаптированный к условиям задач исследования. Разработан и реализован специальный алгоритм «сшивки лакун», позволяющий устранить пропуски данных в областях низких широт, не охваченных измерениями. Алгоритмы оценки и компенсации движения реализованы итерационно, с возможностью объединять промежуточные результаты расчетов и новые массивы спутниковых данных для максимально эффективного использования доступной

спутниковой информации. Итоговая точность интерполяционной схемы оценена путем прямого сопоставления интерполированных полей и результатов независимых спутниковых измерений.

Совокупность расчетных глобальных полей восстановленных геофизических параметров и соответствующих векторных полей скоростей адвекции образует новый информационный продукт, позволяющий изучать классы атмосферных процессов путем детального описания их эволюции в терминах временных рядов их интегральных физически значимых характеристик, в частности, адвективных потоков скрытого тепла, одного из ключевых элементов энергобаланса в системе океан-атмосфера. На базе развитого подхода создана единая методика исследований динамики и эволюции разномасштабных атмосферных процессов, вводящая взаимное соответствие между типом процесса и геометрическими и динамическими свойствами окружающего его радиотепловой образ замкнутого контура или отделяющей границы.

Объектом настоящего исследования стали мезомасштабные и синоптические процессы атмосферы. **Конкретный предмет исследования** – параметры и закономерности динамики и эволюции мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов, впервые описываемых с высокой пространственно-временной детализацией массивами и временными рядами физических характеристик (скоростей адвекции, потоков скрытого тепла и др.) на основе замкнутой схемы обработки их радиотепловых образов по данным спутникового мониторинга.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые предложена и программно реализована замкнутая схема интерполяционной обработки регистрируемых со спутников глобальных радиотепловых полей и генерируемых на их основе полей геофизических параметров системы океан-атмосфера, обеспечивающая высокодетальное (с пространственным шагом до 0,125 географического градуса и дискретизацией по времени до 1,5 часов) восстановление их промежуточных состояний, не охваченных данными измерений [Ермаков и др., 2011, 2013б].
2. Методика расчета адвективных (горизонтальных) вертикально интегрированных потоков атмосферного скрытого тепла впервые предложена и реализована в замкнутом виде относительно радиотепловых спутниковых дистанционных данных [Ермаков, Шарков, Чернушич, 2014а,б].
3. Впервые на основе вычисленных по дистанционным данным спутниковых радиотепловых измерений потоков атмосферного скрытого тепла показана связь между конвергентным (дивергентным) режимом адвекции скрытого тепла и интенсификацией (диссипацией) тропических циклонов [Ермаков, Шарков, Чернушич, 2014в, 2017а].
4. Анализ нитевидной структуры атмосферной циркуляции в целях исследования атмосферных рек впервые выполнен по замкнутой схеме обработки радиотепловых

спутниковых дистанционных данных на основе предложенных алгоритмов [Ермаков, 2017б; Ермаков, 2017].

5. Картина глобальной атмосферной циркуляции, охватывающая пятнадцатилетний интервал (2003 – 2017 годы), впервые детально (на сетке с пространственным шагом 0,25 географического градуса и дискретизацией по времени 3 часа) восстановлена на основе данных спутниковых радиотепловых дистанционных измерений [Ермаков, Шарков, Чернушич, 2017б; Ермаков, 2018].
6. Впервые с помощью созданного геопортала спутникового радиотепловидения реализован открытый доступ к глобальным полям ряда основных геофизических параметров системы «океан-атмосфера» (интегральное влагосодержание, полный водозапас облаков, скорость приводного ветра) и векторному полю адвекции водяного пара в непрерывном интервале наблюдений 2003 – 2017 гг. при полном пространственном покрытии акваторий Мирового океана на сетке 0,25° с шагом по времени 6 часов, а также интерактивный инструмент их интерполяции на произвольный момент времени [Ермаков, Чернушич, 2017а,б].

Предмет защиты. Совокупность полученных 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. Спутниковое радиотепловидение предлагает и реализует единый подход к обработке и анализу данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли как хронологической последовательности радиотепловых образов наблюдаемых процессов в системе океан-атмосфера с целью детального описания их динамики и эволюции расчетными временными рядами физических характеристик массо- и энергообмена. К настоящему времени, в частности, не предложено альтернативных подходов к вычислению адвективных потоков атмосферного скрытого тепла с достигнутой полнотой и детальностью на основе замкнутой схемы анализа дистанционных данных спутникового радиотеплового мониторинга. Исследование представляет существенный вклад в мировую науку как с точки зрения практической ценности при обработке оперативной спутниковой информации, так и с теоретических позиций, что раскрывают основные **положения, выносимые на защиту**:

1. Предложена и реализована методика интерполяционной обработки имеющихся радиотепловых спутниковых дистанционных данных, дополняющая классический СВЧ-радиометрический метод кинематическим описанием адвекции, которая обеспечивает пространственно-временную детальность и точность восстановления глобальных геофизических полей системы «океан-атмосфера», достаточные для широкого спектра практических и фундаментальных применений.

2. Разработана методика расчета адвективных (горизонтальных) потоков атмосферного скрытого тепла, замкнутая относительно имеющихся радиотепловых спутниковых дистанционных данных, которая обеспечивает независимую проверку и уточнение ряда теоретических оценок и предположений (элементов энергетического баланса тропических циклонов, адвекции скрытого тепла в синоптических процессах и климатической системе в целом), до настоящего времени не имевших статистически репрезентативных экспериментальных подтверждений.
3. На основе анализа рассчитанной мощности адвективных потоков скрытого тепла в процессе эволюции тропических циклонов (ТЦ) показано, на примере исследования более 10 индивидуальных ТЦ и двойной системы тайфунов-близнецов, что конвергентные (сходящиеся к центру ТЦ) потоки соответствуют интенсификации ТЦ, а дивергентные – его диссипации.
4. В условиях почти идентичного состояния океана сценарии эволюции ТЦ могут существенно различаться (от быстрой интенсификации до квазистационарного режима и диссипации) в зависимости от мощности и направления потоков атмосферной адвекции скрытого тепла, что показано с помощью реализованной методики совместного анализа полей интегрального влагосодержания атмосферы и композитных полей температуры поверхности океана на примере урагана Alberto (2000), супертайфуна Haiyan (2013) и тропического шторма Podul (2013).
5. Совокупность реализованных алгоритмов спутникового радиотепловидения позволяет преодолеть основные трудности анализа нитевидной структуры глобальной атмосферной циркуляции и исследования атмосферных рек: фрагментации объектов исследования вследствие их значительной зональной протяженности и расхождения полос спутникового сканирования; пространственно-временного совмещения полей различных геофизических параметров для их совместного анализа, а также позволяют получить необходимую количественную информацию о формируемых атмосферными реками потоках скрытого тепла.
6. Анализ глобальной атмосферной циркуляции на временном интервале 2003 – 2017 годов реалистично воспроизвел многие ее характерные элементы и параметры (структуру ячеек циркуляции, направления и скорости зонального переноса, широтные распределения меридиональных потоков скрытого тепла, суточную и сезонную цикличность), что, в частности, доказывает, что информация о ряде ключевых свойств атмосферной циркуляции непосредственно содержится в данных спутниковых дистанционных наблюдений и может быть извлечена из них с помощью предложенных и реализованных алгоритмов спутникового радиотепловидения.
7. Разработанный и созданный геопортал спутникового радиотепловидения (<http://fire.fryazino.net/tpw/>) реализует процедуры удаленной работы с глобальными полями ряда геофизических характеристик системы «океан-атмосфера», а также интерактивной

совместной обработки этих данных с информацией из других открытых источников средствами виртуальной интеграции.

Достоверность представленных результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата и подтверждается, в части интерполяционной методики, сопоставлением с независимыми спутниковыми измерениями, а в части оценок динамических и энергетических характеристик атмосферных процессов – хорошей воспроизводимостью результатов на многочисленных независимо проанализированных реализациях (в частности, тропических циклонах 2000, 2005, 2013 и 2015 гг.), соответствием общефизическим представлениям о динамике и эволюции исследованных процессов и принципиальным согласием с рядом известных теоретических оценок.

Научная и практическая значимость. Основные результаты, представленные 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).

Развитая методика восстановления динамики полей геофизических параметров системы океан-атмосфера дает непосредственную возможность для качественного и количественного экспресс-анализа эволюции атмосферных процессов. Она может быть широко использована для оптимального пространственно-временного совмещения радиотепловых дистанционных данных с информацией независимых измерений, что открывает новые перспективы как для совместного анализа разнородной спутниковой информации, так и для калибровки и кросс-калибровки спутниковых радиометрических приборов. Расчеты адвективных потоков скрытого тепла могут быть использованы для дополнения и уточнения теоретических представлений и дальнейшего развития оперативных моделей эволюции быстроразвивающихся атмосферных явлений, в том числе, катастрофического характера. Высоко детальные временные ряды меридиональных потоков скрытого тепла могут быть применены как для анализа синоптических режимов и климатических вариаций в отдельных регионах (например, в Арктике) на многолетних масштабах, так и в фундаментальных исследованиях формирования климата планеты в качестве нового типа информации, извлекаемой непосредственно из данных спутниковых измерений. Большое значение имеет обеспечение широкого научного сообщества свободным доступом к результатам массовой обработки спутниковых радиотепловых данных. Под руководством и при непосредственном участии автора спроектирован и развивается геопортал спутникового радиотепловидения (<http://fire.fryazino.net/tpw/>).

Апробация работы. Представленные в диссертации результаты докладывались на заседаниях Ученого совета ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (2015) и Фрязинской секции Ученого совета ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (2015, 2016); научно-квалификационных

семинарах ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по направлениям «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы» и «Статистическая радиофизика» (2011–2018); семинарах Отдела исследования Земли из космоса ИКИ РАН «Физические основы микроволнового зондирования» (2011), Отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН (2016), НИВЦ МГУ «Математическое моделирование геофизических процессов – прямые и обратные задачи» (2018); Школе-семинаре «Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике» (Таруса, 2015); Седьмой школе-семинаре «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2016); Международных симпозиумах ESA Living Planet Symposium (Edinburgh, 2013), International Symposium on Remote Sensing of Environment (Sydney, 2011; Berlin, 2015); Международных конференциях «Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе» (Владивосток, 2013), «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2013); «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (Москва, 2014); «Современные информационные технологии для научных исследований в области наук о Земле» (Южно-Сахалинск, 2016); Всероссийских открытых ежегодных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2011–2017), VIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2014); Всероссийских Армандовских чтениях (Муром, 2017, 2018).

Личный вклад автора. Автором лично:

- проведен анализ обратной задачи восстановления динамики атмосферных процессов по данным спутникового радиотеплового мониторинга, выработана общая концепция ее решения и синтезирована реализующая ее вычислительная схема;
- предложен и создан единый методический подход к детальному исследованию формирования и эволюции мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов, получивший название «спутниковое радиотепловидение»;
- спроектированы и реализованы блоки программно-математического обеспечения, осуществляющие этапы автоматизированной обработки спутниковой информации;
- выполнен анализ точности реализованной вычислительной схемы;
- предложена, разработана и программно реализована методика расчета адвективных потоков атмосферного скрытого тепла;
- произведена массовая обработка данных спутникового радиотеплового зондирования и выполнен анализ ее результатов в рамках сформулированных задач исследования эволюции тропических циклонов и атмосферных рек, расчета характеристик глобальной атмосферной циркуляции; результаты обработки также использованы для наполнения архива данных созданного по инициативе и под руководством автора геопортала спутникового радиотепловидения.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация соответствует формуле специальности «01.04.03 Радиофизика» и относится к области исследования,

указанной в паспорте специальности под номером 5 в части «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации представлены в перечисленных ниже 23 работах, проиндексированных в РИНЦ: 17 статьях в изданиях из перечня ВАК, 2 – в других рецензируемых периодических научных изданиях; 3 – в материалах международных и 1 – Всероссийской конференций. Среди указанных публикаций на момент завершения диссертации 7 проиндексированы в системе Web of Science (WoS), 11 – в Scopus. Индекс Хирша автора: в РИНЦ – 9, в WoS – 2, в Scopus – 4. Общее число цитирований работ автора в системе РИНЦ – 291.

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

Благодарности. Автор выражает глубочайшую признательность своему научному консультанту, профессору Е.А. Шаркову, который привлек его внимание к своей концепции «анимационного анализа» дистанционных данных для изучения глобального тропического циклогенеза, итогом чего стала представленная диссертация. Без помощи и поддержки Е.А. Шаркова на всех ключевых этапах исследования успешное решение поставленных задач было бы невозможно. Автор сердечно благодарит своего друга и соавтора по большому числу публикаций к.ф.-м.н. А.П. Чернушича за эффективное сотрудничество и полезные советы при создании программных блоков, реализующих алгоритмы спутникового радиотепловидения, а также за содержательные обсуждения полученных результатов. Автор глубоко признателен проф. Б.Г. Кутузе за неизменный интерес к теме исследования и ценные рекомендации при подготовке диссертации. Автор также искренне благодарен своим многочисленным коллегам, стимулировавшим его на написание представленной работы, и хотел бы особо отметить тех, кто любезно согласился критически вычитать фрагменты рукописей автореферата и текста диссертации: Б.Г. Кутузу, В.П. Саворского, М.Т. Смирнова, И.А. Репину, Е.В. Полякову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна исследования, выносимые на защиту положения, описана общая структура диссертационной работы.

Глава 1 раскрывает спутниковое радиотепловидение мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов как обратную задачу дистанционного зондирования Земли радиофизическими методами. **Параграф 1.1** характеризует объекты исследования (рисунок 1).

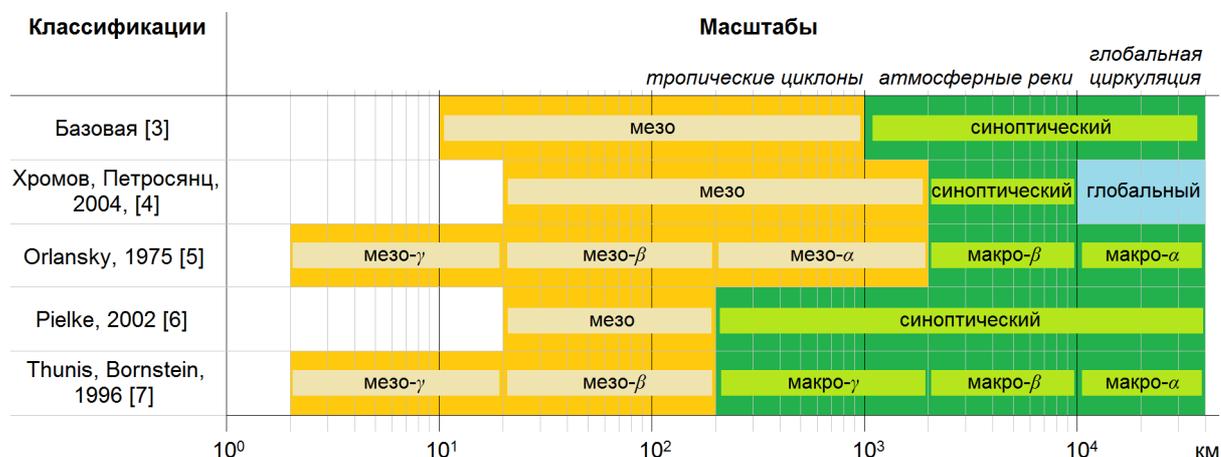


Рисунок 1 – Варианты классификации масштабов атмосферных процессов.

Тропические циклоны выбраны в качестве ярких представителей явлений мезомасштаба, а так называемые «атмосферные реки» – явлений синоптического масштаба. Расчет характеристик глобальной атмосферной циркуляции демонстрирует спектр возможностей спутникового радиотепловидения при изучении наиболее крупномасштабных атмосферных процессов. Таким образом, в рамках единой методологии исследования охвачен диапазон горизонтальных масштабов $10^2 - 10^4$ км.

При формировании и (или) эволюции рассмотренных атмосферных процессов главным, и ряде случаев – определяющим, фактором, требующим тщательного количественного анализа, является адвекция (горизонтальный перенос) водяного пара в нижней тропосфере. Получение в достаточных объемах надежной информации о влагосодержании нижней тропосферы обеспечивают спутниковые радиотепловые (пассивные микроволновые) наблюдения. Краткому обзору истории их развития и современного состояния посвящен **параграф 1.2**.

Наконец, в **параграфе 1.3** описана общая постановка обратной задачи анализа динамики нижней тропосферы по периодически измеряемым полям ее геофизических параметров. Принципиальной основой решения являются так называемые алгоритмы анализа оптического потока, потребовавшие существенной доработки с учетом природы анализируемой дистанционной информации. Результатом полученного и представленного в диссертации решения являются не только восстановленные кинематические характеристики движения воздушных масс (скорости адвекции водяного пара в нижней тропосфере), но и важнейшие

энергетические характеристики – интегральные горизонтальные потоки скрытого тепла (потенциальной энергии фазовых переходов атмосферной влаги) через заданные границы.

Глава 2 посвящена подробному рассмотрению и анализу полученного в работе решения. В **параграфе 2.1** обсуждены физико-математические основания предложенного подхода. Проблема сформулирована в общем виде как обратная задача «анализа оптического потока» и «оценки и компенсации движения». Обсуждены методы извлечения информации о движении по последовательности наблюдений за некоторой областью пространства.

Пусть данные наблюдений представлены в виде поля скалярной величины $I(x, y, t)$, значения которой известны во всех узлах (x, y) некоторой регулярной сетки в моменты времени t , повторяющиеся с периодом Δt . Процесс, вызывающий изменение поля в некоторой точке, в зависимости от своих масштабов и размеров пятна разрешения, может либо быть локализован в этой точке, либо охватывать некоторую ее окрестность. Например, влагосодержание атмосферы может меняться как вследствие испарения и конденсации влаги, так и из-за адвекции воздушных масс. Группа методов, ставящих целью восстановление характеристик движения по изменению наблюдаемых полей во времени, получила развитие в рамках задач технического зрения и обработки видеоданных («анализ оптического потока»).

В качестве отправной точки обычно принимают гипотезу, что наблюдаемые изменения $I(x, y, t)$ полностью определяются смещением его элементов:

$$I(x, y, t + dt) = I(x - u \cdot dt, y - v \cdot dt, t). \quad (1)$$

Здесь dt – малый интервал времени; $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ – компоненты искомого векторного поля скоростей «оптического потока». В дополнительном предположении, что на интервале времени dt поле $I(x, y, t)$ характеризуется достаточной гладкостью, разложение (1) в ряд Тейлора с точностью до членов второго порядка малости позволяет связать компоненты скорости с частными производными $I(x, y, t)$ в явном виде:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial I}{\partial y} \cdot v = 0. \quad (2)$$

Фундаментальной проблемой является недостаточность одного уравнения (2) для определения двух независимых компонент скорости. Легко видеть, что (2) определяет лишь проекцию скорости потока на направление градиента $I(x, y, t)$, смещения вдоль изолиний

неразличимы. Поэтому в общем случае требуются дополнительные предположения относительно компонент $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ и частных производных $I(x, y, t)$ более высокого порядка, а поиск решения может осуществляться разложением (1) до квадратичных членов.

Ряд развитых на практике подходов приводит к возникновению переопределенной системы уравнений, позволяющей получить приближенное решение для компонент скоростей потока. В основном, эти подходы могут быть обобщены моделью «твердотельного движения». Пусть в окрестности некоторой точки градиент $I(x, y, t)$ существенно меняет направление. Тогда обе ортогональные компоненты движения могут быть восстановлены в этой окрестности при условии, что в разных ее точках векторы скорости согласованы между собой (в первом приближении – одинаковы). Эта идея может быть формализована с помощью требования

$$\iint_{\Omega} D(x, y, u_0, v_0, t) dx dy \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Ω – малая область изображения, в которой компоненты оптического потока u_0 и v_0 можно считать постоянными, и

$$D(x, y, u_0, v_0, t) = [I(x, y, t + dt) - I(x - u_0 \cdot dt, y - v_0 \cdot dt, t)]^2 \quad (4)$$

При разложении (4) до членов второго порядка условие (3) дает нелинейную систему уравнений, которую можно решить относительно u_0 и v_0 методом последовательных приближений, если в анализируемой области $I(x, y, t)$ не вырождается в квазиодномерную структуру с постоянным направлением градиента.

Условие (3), (4) является своего рода ослабленным аналогом требования (1) для некоторой области изображения. Получаемое в результате решение относится ко всей области в целом, поэтому для детализации пространственной информации о движении необходимо рассматривать как можно меньшие области. При этом, однако, возрастает вероятность того, что поле $I(x, y, t)$ окажется вырожденным на области Ω в указанном выше смысле.

На поиск компромисса между детальностью и точностью решения направлена группа «блочных» методов, предлагающих различные подходы к оптимизации размеров и форм рассматриваемых областей («блоков») и их взаимного расположения, а также критериев отождествления блоков. К наиболее гибким относятся «пирамидальные» подходы, использующие в расчетах иерархическую систему блоков. Первое приближение к решению

строится на самом большом пространственном масштабе, что обеспечивает его устойчивость. На каждом следующем шаге с помощью блоков меньших размеров осуществляется уточнение предыдущей итерации решения.

Требование (3) можно интерпретировать как критерий «похожести» блока, занимающего область Ω в момент времени $t + dt$, на блок, смещенный относительно Ω в предшествующий момент времени t по вектору оптического потока. В качестве метрики, кроме суммы квадратов разностей (4) на практике часто используется сумма абсолютных разностей:

$$D(x, y, u_0, v_0, t) = |I(x, y, t + dt) - I(x - u_0 \cdot dt, y - v_0 \cdot dt, t)| \quad (5)$$

Дальнейшее обобщение вида метрических функций позволяет избавиться от требования постоянства скорости оптического потока на малых областях. В этом случае речь идет уже о вариационном подходе, регуляризирующем решение одновременно на всей области наблюдений, например:

$$\iint \left[\left(\frac{\partial I}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial I}{\partial y} \cdot v + \frac{\partial I}{\partial t} \right)^2 + \alpha^2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \right] dx dy \rightarrow \min. \quad (6)$$

Здесь I , u и v являются функциями координат и времени, α – регуляризирующий множитель. Критерий (6) нацелен на поиск среди всех (приближенных) решений уравнения оптического потока того, которое обладает наименьшей пространственной изменчивостью. Предложены многочисленные альтернативные критерии оптимизации. Проблемой всех таких подходов является известный произвол в выборе критерия гладкости, что может приводить к возникновению значительных артефактов решения.

В заключение параграфа выполнен краткий обзор применения алгоритмов анализа оптического потока (или родственных ему) в различных задачах дистанционного зондирования, а также основания для его применения при анализе полей интегральных геофизических полей атмосферы в рамках спутникового радиотепловидения.

Параграф 2.2 описывает синтез базовой вычислительной схемы. Ее спецификой является необходимость построения на заданной регулярной координатной сетке опорных полей геофизических параметров $I(x, y, t)$, не содержащих «лакун», т.е. областей, не покрытых наблюдениями. Для заполнения таких областей предложена интерполяционная методика,

названная «сшивкой лакун» (рисунок 2). Физический смысл процедуры состоит в гладком распространении значений поля $I(x, y, t)$ внутрь лакуны вдоль продолжений изолиний поля.

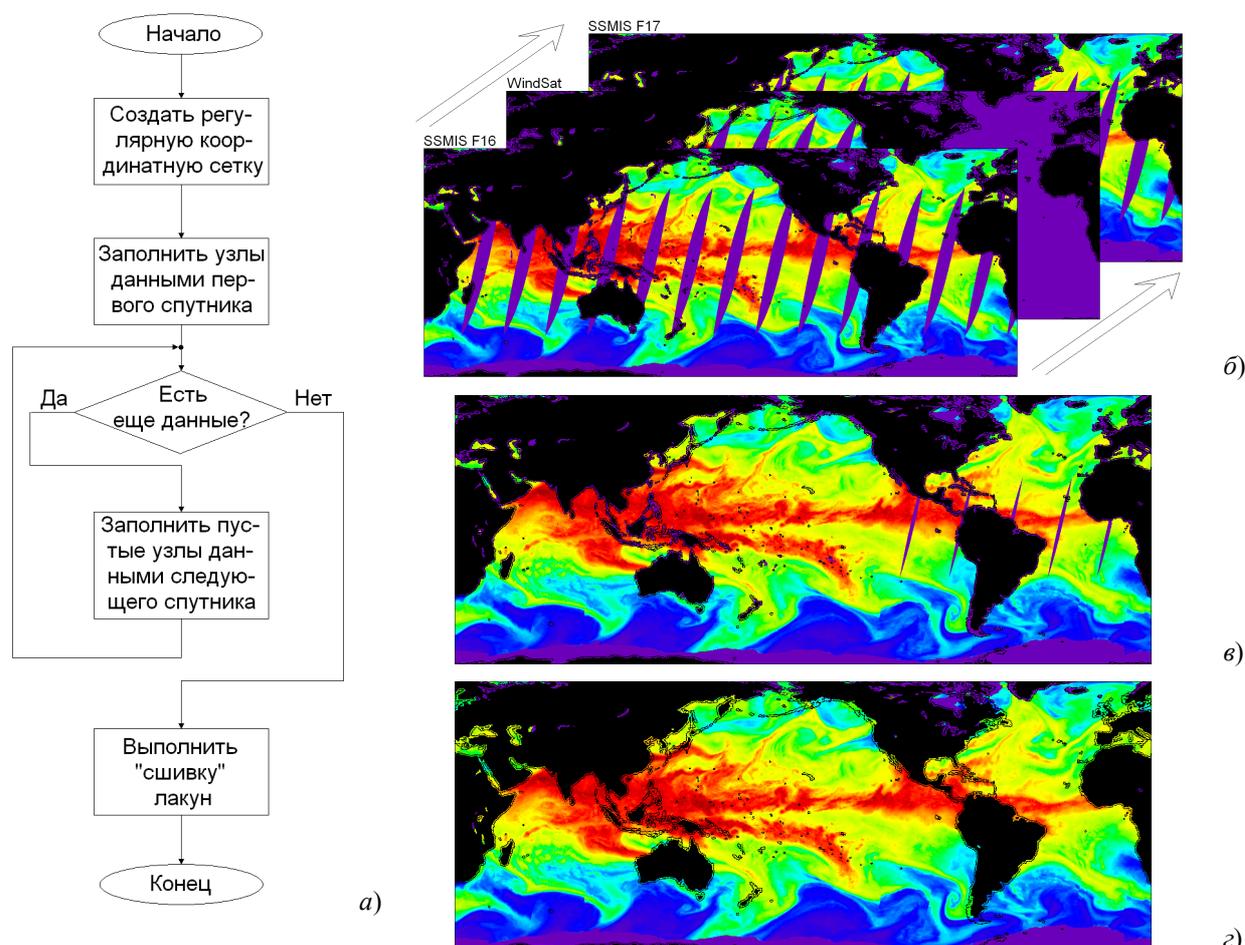


Рисунок 2 – Построение опорных полей: а) блок-схема; б), в), г) этапы исполнения. Пример обработки данных за 22/23 июня 2016 г. На первом этапе доступные данные упорядочиваются по близости времени измерений и приоритету спутниковых приборов. Заполнение узлов координатной сетки начинается с данных измерений приборов SSMIS на спутнике DMSP F17 (местное время нисходящих узлов около 06:00). Оставшиеся пустыми узлы последовательно заполняются данными WindSat на спутнике Coriolis (нисходящие узлы около 06:00) и SSMIS на DMSP F16 (около 04:30), (б). В результате, лакуны в низких широтах ликвидированы или значительно сужены, (в). На последнем этапе узкие лакуны окончательно заполняются специальным алгоритмом «сшивки лакун», (г).

Построение опорных полей путем объединения данных нескольких спутников, близких по времени измерений, и применения процедуры «сшивки лакун» позволяет далее реализовать шаг пространственно-временной интерполяции этих полей (основанной на алгоритмах анализа

оптического потока) как для расчета промежуточных состояний этих полей, так и для расчета поля адвекции, описывающего их эволюцию во времени.

В параграфе 2.3 исследован вопрос результирующей точности синтезированной схемы пространственно-временной интерполяции спутниковой информации. С этой целью был применен, в частности, подход, описанный в работе [Wimmers, Velden, 2011]. Глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы (ИВС), построенные на регулярной сетке координат, были подвергнуты пространственно-временной интерполяции и, в результате, оптимально совмещены по времени с аналогичными глобальными полями, построенными независимо на основе серий измерений другими спутниковыми приборами. Качество интерполяции было охарактеризовано невязками между указанными рядами данных (их средними значениями и другими параметрами функций распределения). Точность пространственно-временной интерполяции полей ИВС оказалась выше, чем в упомянутой выше работе. Средняя невязка значений ИВС при оптимальном пространственно-временном совмещении двух рядов данных (выборки объемов порядка 10^7 пар независимых измерений, распределенных равномерно в географическом и временном отношении) составила около $0,8 \text{ кг/м}^2$ (или $0,8 \text{ мм}$), рисунок 3.

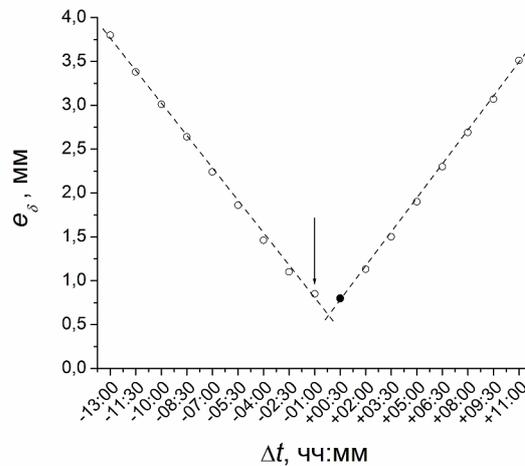


Рисунок 3 – Средняя невязка интерполированного поля интегрального влагосодержания атмосферы по данным SSMIS F16 с независимыми данными по измерениям SSMIS F17 как функция «синхронизации».

На графике рисунка 3 Δt – интервал времени между моментом фактических измерений SSMIS F17 и моментом, на который интерполированы данные SSMIS F16. Фактические измерения SSMIS F16 опережают измерения SSMIS F17 на 1 час (вертикальная стрелка на графике). Невязка монотонно убывает с уменьшением модуля Δt вплоть до $0,8 \text{ мм}$ при наилучшем достигнутом временном совмещении (черный кружок на графике).

В параграфе 2.4 представлено итерационное расширение базовой схемы пространственно-временной интерполяции геофизических атмосферных полей, нацеленное на использование максимального объема доступных данных, рисунок 4.

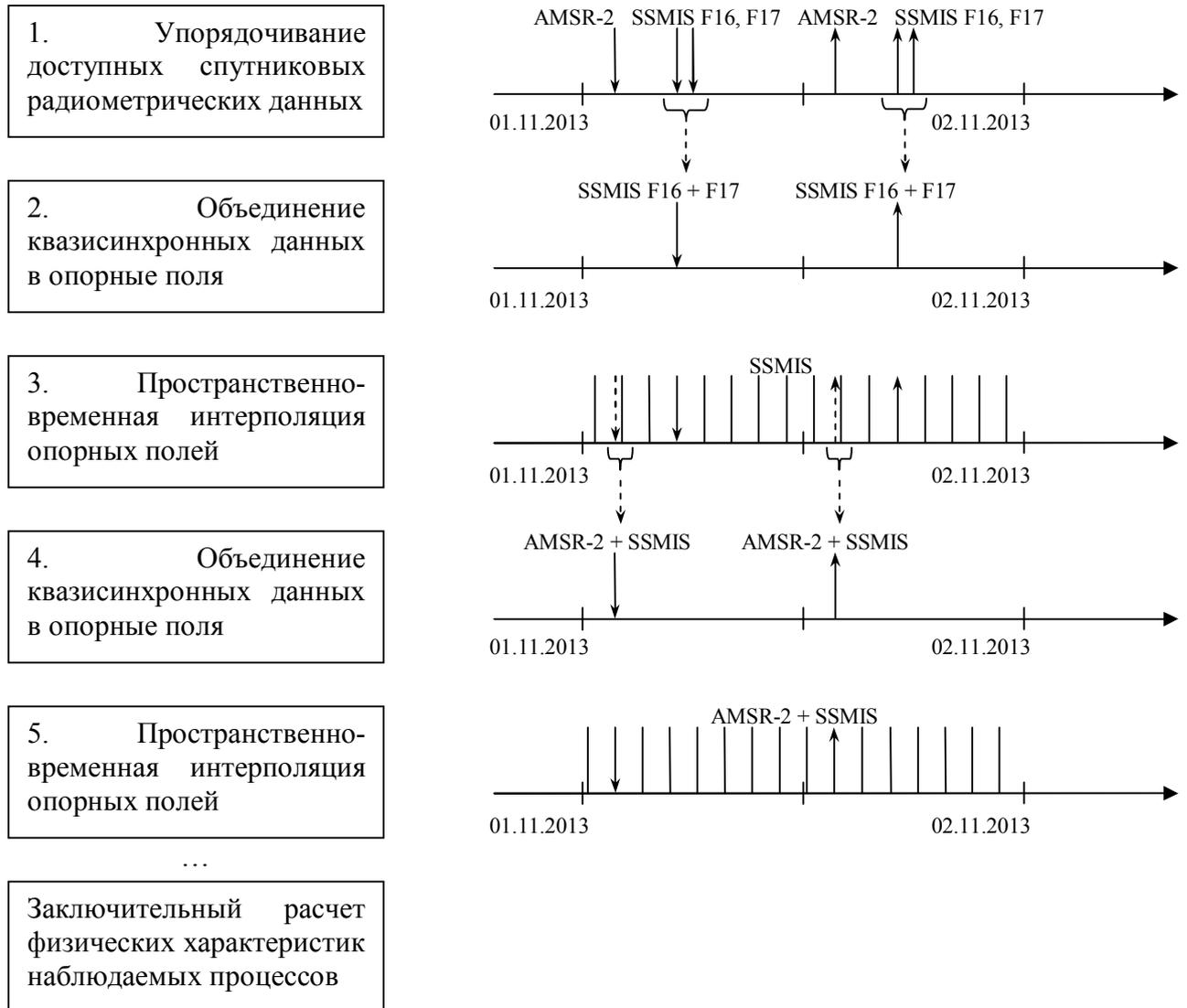


Рисунок 4 – Итерационная схема построения и пространственно-временной интерполяции полей геофизических параметров глобального покрытия по данным спутниковых радиометрических наблюдений (на примере данных приборов SSMIS и AMSR-2).

Если непосредственное объединение всей доступной спутниковой информации в опорные поля невозможно по причине существенной несинхронности измерений, то эффективным решением является объединение части спутниковой информации и ее пространственно-временная интерполяция для дальнейшего совмещения с оставшейся частью данных. Совмещенные данные формируют новые опорные поля, которые подвергаются повторной пространственно-временной интерполяции, и т.д. Результатом может стать, в частности,

выигрыш в пространственной детальности восстановленных полей за счет использования дополнительных спутниковых данных более высокого пространственного разрешения.

Параграф 2.5 посвящен анализу новых возможностей исследования атмосферных процессов, предоставляемых реализованной схемой пространственно-временной интерполяции. Одной из основных, широко примененных в представленной работе, является возможность вычисления локальных и интегральных характеристик массо- и энергообмена, осуществляемого атмосферными процессами, и, в частности, расчета мощности адвективного (горизонтального) потока скрытого тепла через произвольно задаваемые границы, рисунок 5.

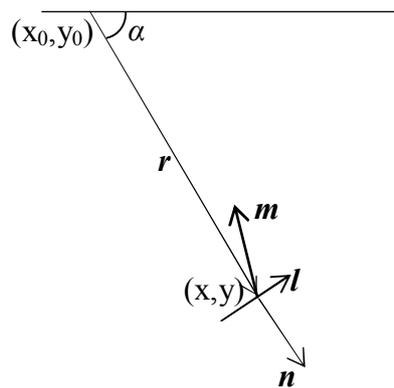


Рисунок 5 – Схема расчета потока через элемент контура.

Так, для потока поля скоростей адвекции \vec{v} через элемент контура, расположенного у конца радиус-вектора \vec{r} , исходящего из начальной точки (x_0, y_0) и составляющего угол α с горизонтальной осью, получено выражение

$$d\Phi(x, y) = -(\vec{v} \cdot \vec{n}') \cdot |l'| = -\frac{R^2 s^2 r (\sin^2(sy) m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha) \sqrt{\sin^2(sy) \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}}{\Delta t \sqrt{\sin^2(sy) \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}} d\alpha, \quad (7)$$

где эффективная скорость адвекции водяного пара определяется выражением

$$\vec{v} = \frac{Rs(\sin(s \cdot y) \cdot m_x, -m_y)}{\Delta t}, \quad (8)$$

в котором $R = 6371$ км – средний радиус Земли, Δt – временной шаг интерполяции, s – шаг расчетной сетки в радианах, вектор $\vec{m} = (m_x, m_y)$ описывает вычисленное (в узлах расчетной сетки) смещение элемента поля ИВС из начальной точки (x, y) за время Δt ; нормаль к элементу границы с учетом проективных искажений описывается формулой

$$\vec{n}' = \frac{(\sin(s \cdot y) \cdot \cos \alpha, -\sin \alpha)}{\sqrt{\sin^2(s \cdot y) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}}, \quad (9)$$

а длина элемента контура на поверхности Земли:

$$|l'| = R \cdot s \cdot r \cdot d\alpha \cdot \sqrt{\sin^2(s \cdot y) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (10)$$

где r – длина вектора \vec{r} в координатах расчетной сетки (узлах), а $d\alpha$ – угол, под которым виден элемент контура l из узла (x_0, y_0) .

Знак в (7) выбран таким образом, чтобы положительный поток был направлен внутрь контура. Отсюда легко перейти к потоку скрытого тепла через тот же элемент контура:

$$dQ(x, y) = q \cdot W(x, y) \cdot d\Phi(x, y), \quad (11)$$

где $q = 2260$ КДж/кг – удельная теплота парообразования, $W(x, y)$ – значение ИВС атмосферы в точке (x, y) в кг/м² (или в мм).

Численное интегрирование выражения (11) по углу α от 0 до 2π дает значение потока скрытого тепла через круговой контур. Такой расчет актуален при анализе эволюции тропического циклона. Иногда предпочтительно учесть «дрейф» контура относительно Земли. Тогда в выражении (7) нужно вместо скорости \vec{v} подставить скорость $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$, где \vec{u} – скорость дрейфа. Выбор скорости дрейфа определяется постановкой задачи. В ряде случаев в качестве первого приближения можно использовать среднее по контуру значение \vec{v} :

$$\vec{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i, \quad (12)$$

где \vec{v}_i – значение скорости, рассчитанное по (8) для i -го узла сетки, включенного в контур, N – общее число узлов, включенных в контур.

В **Главе 3** продемонстрированы возможности спутникового радиотепловидения для анализа динамических процессов эволюции тропических циклонов в полях геофизических параметров системы океан-атмосфера. **Параграф 3.1** посвящен краткому обзору традиционно используемых характеристик силы (интенсивности) тропического циклона (ТЦ), а также основных путей исследования источников энергии для его интенсификации и перехода в

ураганную фазу. Как известно, океан является главным аккумулятором падающего на Землю солнечного излучения. Поэтому при изучении эволюции (особенно, быстрой интенсификации) ТЦ, прежде всего, заслуживает внимания «конвективная» гипотеза, предлагающая для объяснения эволюции ТЦ механизм прямой (вертикальной) передачи энергии в виде явного и скрытого тепла от океана к действующему ТЦ. На ранних стадиях, когда не сформирован устойчивый вихрь, процессы вертикального теплообмена должны играть основную, но не исключительную роль [Пальмен, Ньютон, 1973, с. 510]. Для объяснения дальнейшей интенсификации зрелых форм ТЦ необходимо рассмотреть альтернативные источники притока энергии, важнейшим из которых является адвекция скрытого тепла от периферии к центру ТЦ в нижней тропосфере. Косвенная роль океана здесь также велика, однако сказывается на значительно больших пространственных-временных масштабах, чем размеры ТЦ и время его быстрой интенсификации.

С точки зрения спутникового дистанционного зондирования основным проблемным аспектом изучения фактора адвекции при анализе эволюции зрелых форм ТЦ является переход от «точечных», «мгновенных» оценок к детальному исследованию изменений двумерной пространственной структуры поля ИВС во времени. Развитый подход спутникового радиотепловидения преодолевает эту проблему путем решения обратной задачи восстановления динамики геофизических полей атмосферы.

В **параграфе 3.2** дана общая характеристика использованных радиотепловых спутниковых данных и методика их обработки, основанная на описанных выше алгоритмах спутникового радиотепловидения. Основная идея состояла построении синхронных временных рядов интенсивности ТЦ (максимальной устойчивой скорости горизонтального ветра в его стене) и мощности адвективного потока скрытого тепла через охватывающие ТЦ круговые контуры, с дальнейшим совместным анализом полученных рядов.

В **параграфе 3.3** приведены результаты анализа эволюции семи ТЦ, достигших зрелой фазы в августе 2000 г. В качестве примера ниже рассмотрен ТЦ Alberto (3 – 23 августа 2000 г.), эволюция которого носила наиболее сложный характер. Траектория ТЦ Alberto представлена на рисунке 6а. Цвета кодируют разные стадии эволюции ТЦ Alberto: TD (тропическая депрессия) – зеленый, TS (шторм) – оранжевый, STS (сильный шторм) – красный, T (ураган/тайфун) – темно красный. ТЦ Alberto трижды достигал стадии урагана. На рисунке 6б представлена эволюция ТЦ Alberto в терминах максимальной устойчивой скорости ветра в стене глаза (красная линия) и минимального давления в центре глаза (черная линия). Достижению стадии урагана каждый раз предшествовала фаза быстрой интенсификации: характерное пороговое значение прироста скорости ~ 15 м/с за сутки иллюстрирует наклон красных пунктирных линий. Одинаковыми цифрами на рисунке 6а и 6б помечены одинаковые моменты времени.

На рисунке 6*в* представлен ТЦ Alberto в поле ИВС на 11:00 UTC 11.08.2000. Цветовая шкала в мм ($\text{кг}/\text{м}^2$) приведена справа. ТЦ окружен двумя контурами с радиусами 40 узлов расчетной сетки ($\sim 8^\circ$) и 44 узла ($\sim 8,8^\circ$). Пара контуров была использована для проверки устойчивости расчетов потока к малым изменениям контура. Как видно из рисунков 6*а* и 6*в*, все время своего существования ТЦ Alberto двигался достаточно далеко от береговой линии.

На рисунке 6*г* представлены расчетные графики потоков скрытого тепла Q в МВт через контуры, приведенные на рисунке 6*в* (черные линии). На этом же графике воспроизведена кривая интенсивности ТЦ (красная линия). Кривые потоков всюду близки друг к другу, что свидетельствует об устойчивости расчетов по отношению к малым изменениям граничного контура.

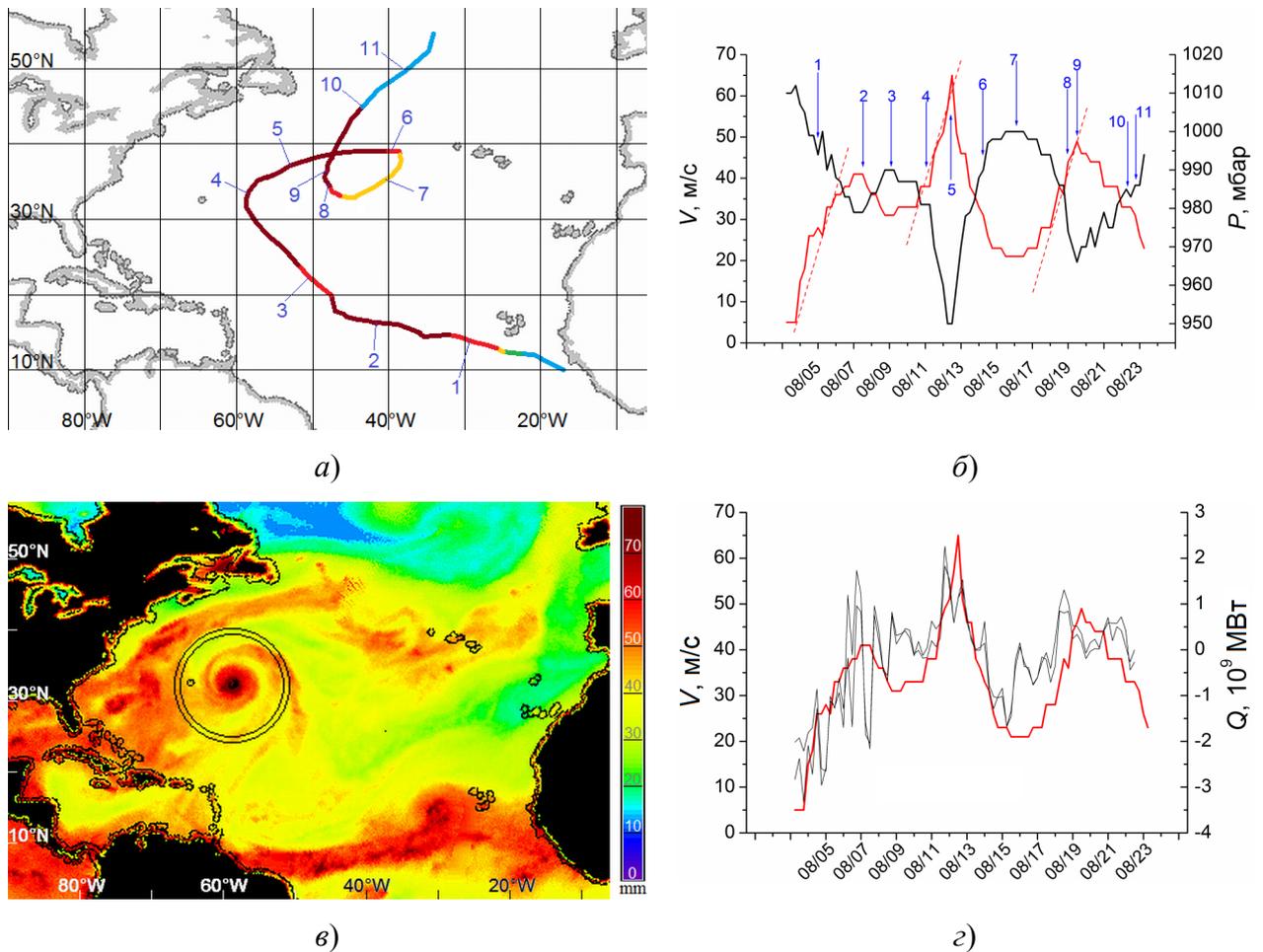


Рисунок 6 – Анализ эволюции ТЦ Alberto: а) траектория ТЦ; б) эволюция ТЦ; в) ТЦ в поле интегрального влагосодержания атмосферы (справа шкала в мм), показаны два контура для расчета потоков; г) адвективные потоки скрытого тепла Q (черные линии) и интенсивность ТЦ (красная линия), см. пояснения в тексте.

Кривые потоков скрытого тепла хорошо воспроизводят основные особенности эволюции ТЦ, в фазе интенсификации наблюдается рост потока скрытого тепла (принято, что положительный поток соответствует конвергенции скрытого тепла, т.е. направлению внутрь контура), в фазе диссипации – уменьшение потока.

Третья интенсификация ТЦ имела место при пересечении им собственного «холодного следа». Эта особенность эволюции ТЦ Alberto обсуждена в следующем параграфе.

В **параграфе 3.4** с помощью алгоритмов спутникового радиотепловидения в дополнение к расчету конвергентных и дивергентных потоков скрытого тепла через окружающие ТЦ контуры выполнено пространственно-временное совмещение полей ИВС атмосферы и ТПО. Показано, что последнее не играет определяющего значения при эволюции зрелых форм ТЦ. Помимо указанного выше примера ТЦ Alberto рассмотрены ТЦ Haiyan (супертайфун) и тропический шторм Podul (2013 г.), сформировавшиеся над северо-западом Тихого океана с разницей в одну неделю и двигавшиеся по близким траекториям над одинаково прогретыми океаническими водами. В отличие от ТЦ Haiyan, имевшего четко выраженную фазу интенсификации, связанную с конвергенцией скрытого тепла пиковой мощности порядка 8 ПВт, тропический шторм Podul не достиг фазы тайфуна, а соответствующие потоки адвекции скрытого тепла имели характер колебаний около нулевого значения при сравнительно небольшой амплитуде.

Параграф 3.5 посвящен анализу системы взаимодействующих тайфунов-близнецов Goni и Atsani (2015 г.). Организованные ими потоки адвекции скрытого тепла имели сложную пространственную структуру, и индивидуальный анализ эволюции каждого из ТЦ, по аналогии с рассмотренными выше случаями, был, в силу этого обстоятельства, неэффективен. Введением сложных контуров, охватывающих систему двух взаимодействующих ТЦ, удалось показать связь общей интенсивности системы с величиной и направлением формируемых ей адвективных потоков скрытого тепла. С методической точки зрения решение этой задачи демонстрирует возможности распространения подхода спутникового радиотепловидения на широкий спектр мезомасштабных атмосферных процессов, для чего требуется установить систему контуров, параметры которых (размеры, форма, скорость дрейфа, допустимые деформации) наиболее адекватно описывают свойства объектов исследования.

Глава 4 описывает возможности спутникового радиотепловидения для изучения синоптических атмосферных процессов на примере атмосферных рек (АР). АР – нитевидные структуры в поле атмосферного водяного пара, обеспечивающие быстрый перенос влаги из тропиков в средние и высокие широты. Систематические исследования АР выявили их существенную роль в меридиональном транспорте атмосферного скрытого тепла. Установлено,

что АР являются причиной значительного числа экстремальных погодных явлений в прибрежных районах.

Существенный интерес представляет климатология АР, т.е. статистика их характеристических параметров на климатически значимых масштабах. Значительные усилия исследователей направлены на разработку и совершенствование алгоритмов обработки спутниковых данных для автоматического детектирования и восстановления параметров АР. В **параграфе 4.1** резюмированы проблемы исследования АР по данным радиотеплового спутникового зондирования и пути их преодоления с помощью спутникового радиотепловидения. В **параграфе 4.2** обсужден новый алгоритм автоматического детектирования АР на основе интерполированных полей интегрального влагосодержания атмосферы. **Параграф 4.3** демонстрирует возможности спутникового радиотепловидения для вычисления потоков скрытого тепла, формирующихся в АР, и их сопоставления с «фоновыми» потоками вне АР.

Автоматическое детектирование АР предполагает поиск узких протяженных атмосферных особенностей, более 2000 км в длину и менее 1000 км или 500 км в ширину, характеризующихся высоким интегральным влагосодержанием. Разрывы в анализируемых полях приводят к фрагментации объектов поиска, существенно затрудняют обнаружение его частей и оценку его полных линейных размеров. Спутниковое радиотепловидение обеспечивает восстановление полей интегрального влагосодержания атмосферы без пропусков и кардинально облегчает автоматическое детектирование протяженных атмосферных особенностей, рисунок 7.

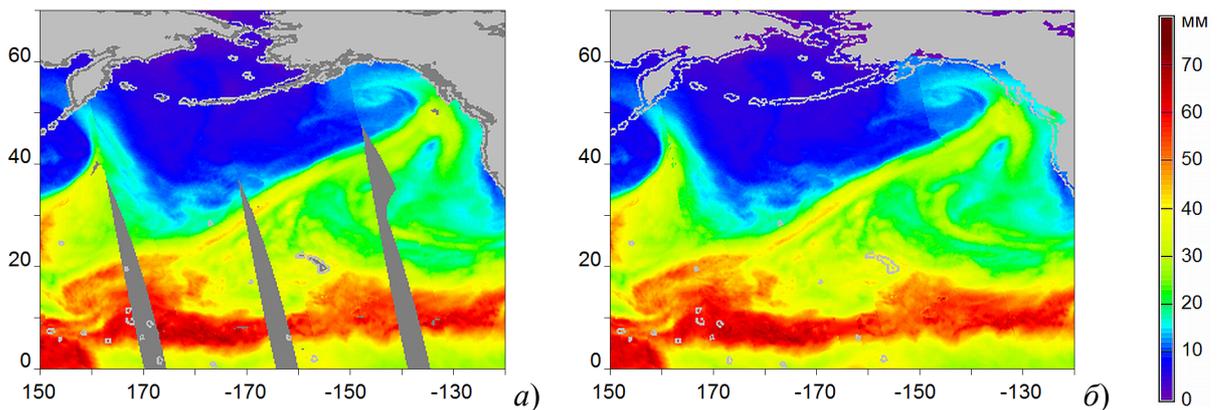


Рисунок 7 – Фрагмент поля интегрального влагосодержания атмосферы над Тихим океаном (цветовая шкала значений в мм – справа) за 01.12.2016: *а)* мозаика по данным SSMIS F16 и SSMIS F17; *б)* продукт спутникового радиотепловидения. На полях географические координаты фрагмента в градусах; положительные значения – для северного и восточного полушарий, отрицательные – для южного и западного.

На рисунке 7 отчетливо видна АР, начинающаяся во внутритропической зоне конвергенции около 20° с.ш., 170° в.д. и протянувшаяся в северо-восточном направлении до западного побережья Северной Америки. При стандартном мозаичном объединении данных АР распадается на 3 фрагмента (рисунок 7а). Спутниковое радиотепловидение позволяет восстановить целостную картину явления (рисунок 7б).

Объединение поля интегрального влагосодержания с векторными полями адвекции водяного пара способно существенно улучшить результаты детектирования, однако до сих пор такая возможность рассматривалась только в связи с применением схем синоптического численного моделирования. Спутниковое радиотепловидение предлагает альтернативный подход, обеспечивая расчет поля адвекции непосредственно из серии спутниковых наблюдений (см. ниже примеры на рисунке 8).

Глава 5 демонстрирует возможности подхода спутникового радиотепловидения при анализе глобальной атмосферной циркуляции. Рассмотрение посвящено тому, какую качественную и количественную информацию о климатической системе можно извлечь на основании данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли с использованием развитого подхода. Результаты расчетов охватили почти полный 15-летний временной интервал, образовав около 22000 пар скалярных полей интегрального влагосодержания размерами 1440×720 элементов и соответствующих им векторных полей адвекции. Рисунок 8 иллюстрирует примеры таких пар, относящихся к крайним датам всего диапазона, 01.01.2003 и 01.10.2017, соответственно. Цветовой тон кодирует значение ИВС. Векторы обозначают направление и скорость адвекции. Вследствие проективных искажений на изображениях невозможно соблюсти единый масштаб отображения зональной компоненты, поэтому справа приведены референсные орты, соответствующие скорости 10 м/с на разных широтах.

Для получения наиболее общего представления о рассчитанном массиве данных было построено среднее за все время наблюдений поле ИВС и соответствующее среднее поле адвекции. Результат представлен на рисунке 9. В средней картине циркуляции доминирует зональная компонента. В согласии с хорошо известными данными, наблюдается устойчивый восточный перенос в низких широтах и противоположный ему западный перенос в более высоких широтах вплоть до $60 - 70^{\circ}$. Полосы близких к нулевым значений скоростей около 25° широты в обоих полушариях хорошо соответствуют границам ячеек Хедли.

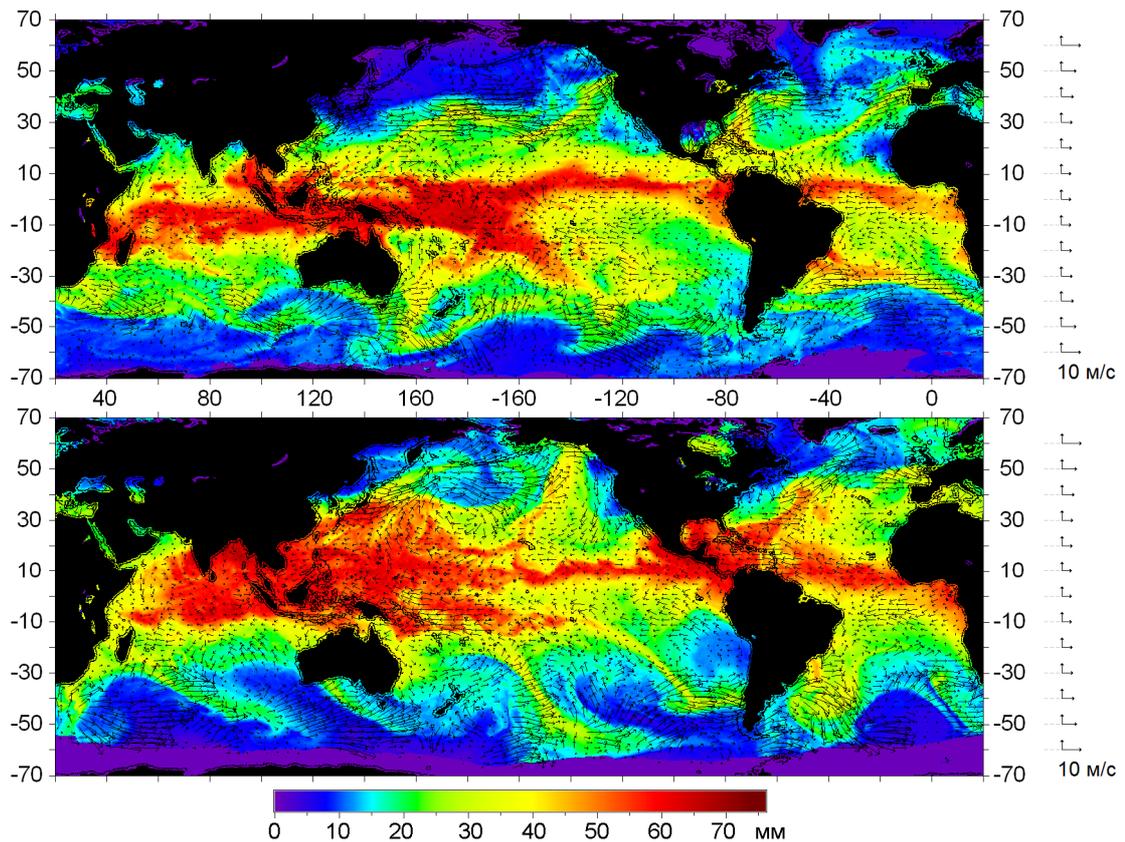


Рисунок 8 – Объединенные поля интегрального влагосодержания атмосферы (цвет, шкала значений в мм внизу) и скорости адвекции (векторы, калибровочные эталоны справа): расчет по данным 01.01.2003 (вверху) и 10.01.2017 (внизу). По краям изображений значения широт и долгот в градусах.

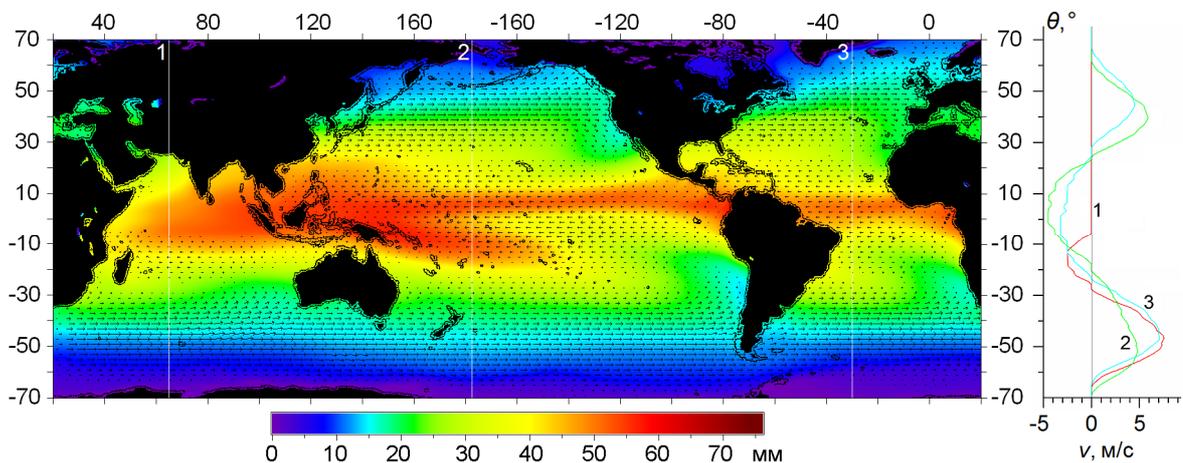


Рисунок 9 – Среднее поле интегрального влагосодержания атмосферы за все время наблюдений, исключая неполный 2017 г. (цвет, шкала значений в мм внизу) и соответствующее ему среднее поле скоростей адвекции (векторы). Справа – зональные компоненты скорости адвекции v , м/с как функции широты θ вдоль меридиональных разрезов: 1) 65° в.д.; 2) 178° з.д.; 3) 30° з.д. в интервале от 70° ю.ш. до 70° с.ш.

На рисунке 9 также показаны три меридиональных разреза над акваториями Индийского, Тихого и Атлантического океанов, обозначенные «1», «2» и «3». Изменение зональной компоненты скорости адвекции v , м/с вдоль этих разрезов (как функции широты θ) иллюстрируют приведенные на графике справа кривые 1 – 3. Максимумы западного переноса достигаются между 40 и 50° широты в каждом из полушарий и больше по величине в южном полушарии. Полученные результаты находятся в хорошем численном согласии с известными данными о средней зональной циркуляции [Пальмен, Ньютон, 1973]. Средний меридиональный перенос наиболее ярко выражен в умеренных широтах вблизи западных границ континентов обоих полушарий. Его причиной, очевидно, является взаимодействие преобладающих потоков западного переноса с материками. Еще одной существенной чертой средней меридиональной адвекции является южный перенос над северо-востоком Тихого океана и, в особенности, над Северной Атлантикой. Эта компонента циркуляции является одним из главных факторов, формирующих климат Арктики.

Детализация характеристик атмосферной циркуляции осуществлена путем расчета потоков скрытого тепла через различные семейства границ. На рисунке 10 приведен пример анализа потоков скрытого тепла над Мировым океаном через границы над экватором и 25° северной широты. На графике рисунка 10а черной линией показан рассчитанный временной ряд суммарной мощности потока скрытого тепла через экватор P , ПВт (с дискретизацией 6 часов), а красным – результат его сглаживания в скользящем окне, соответствующем трехмесячному интервалу осреднения. Положительные значения потоков соответствуют направлению на север. Четко прослеживается годичный период колебаний. При этом, однако, дисперсия отклонений от годовой гармоника оказывается значительно выше ее мощности, что говорит о существенном влиянии на общую циркуляцию процессов сравнительно небольших (синоптических и мезо-) масштабов.

Над графиком рисунка 10а дана вейвлетограмма (результат разложения с использованием вейвлета Морле) исходного временного ряда. По вертикальной оси отложен эффективный масштаб, приведенный к интервалу времени в месяцах. Малые масштабы расположены снизу для удобства соотнесения с графиками временных рядов. Максимальный масштаб ограничен значением 96 месяцев (8 лет). Наиболее яркой особенностью проанализированного временного ряда является его годичное колебание. Можно также отметить сложную, но сравнительно слабо выраженную структуру возмущений более мелких масштабов. Фурье-анализ четко выявляет годичную и суточную колебательные гармоники исходного ряда. Соответствующий спектр Фурье приведен на рисунке 10в (суточная гармоника отмечена буквой «С», годичная – «Г»). Горизонтальная координата пересчитана в обратную частоту, т.е. период колебаний в месяцах.

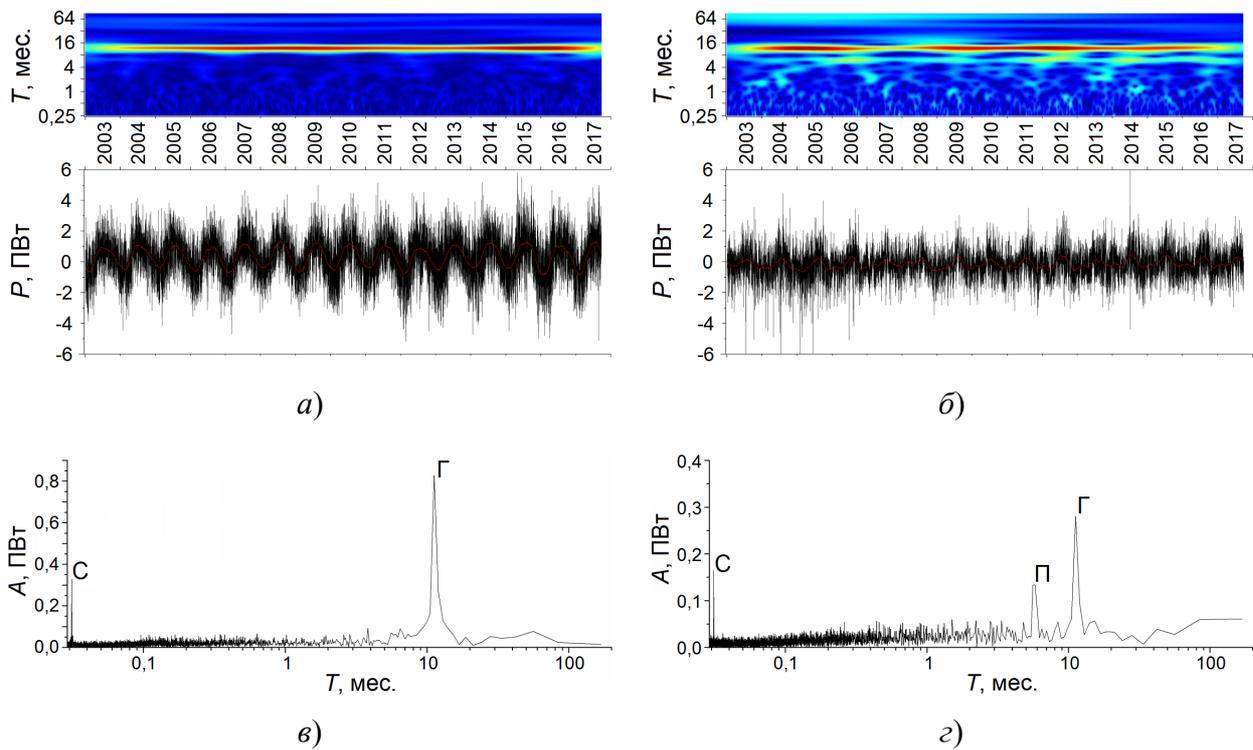


Рисунок 10 – Анализ меридиональных потоков скрытого тепла над Мировым океаном: на широте экватора (слева); на 25° северной широты (справа): временной ряд суммарной мощности потоков P , ПВт с дискретизацией 6 часов (черные кривые) и трехмесячным усреднением (красные кривые); вейвлет-спектры (*а*, *б* сверху) и Фурье-спектры (*в*, *г*) исходного временного ряда (пояснения в тексте).

Второй пример проиллюстрирован рисунками 10б и 10г. Здесь в качестве исходного временного ряда взята суммарная мощность потока через границу 25° северной широты (черная линия на графике 10в). Сглаженный ряд (красная линия) в данном случае характеризуется более нерегулярной, изрезанной формой. Вейвлет-анализ (рисунок 10б сверху) выделяет не только годовую осцилляцию, но и заметное полугодовое колебание, переходящее на мелких масштабах в сложную бифуркационную структуру. Фурье-анализ вновь выявляет наличие суточной («С») и годовой («Г») гармоник, а также более слабой полугодовой («П»), рисунок 10г. Отсутствие ярко выраженных гармоник других периодов, одновременно с существенной дисперсией исходного временного ряда, говорит о том, что значительная часть переносимой энергии распределена почти равномерно по широком спектру частот, соответствующих интервалам времени от единиц суток до единиц месяцев. Этот факт также следует трактовать как проявление вклада турбулентного механизма переноса скрытого тепла, усиливающегося при смещении от экватора к средним широтам.

Также изучена структура меридиональных потоков скрытого тепла как функций широты. С этой целью рассчитаны средние значения мощности потоков через широтные границы с шагом 5° для бореальных лет и зим 2003 – 2017 гг. Для возможности их прямого сопоставления, рассчитанные средние значения потоков были нормированы на длины соответствующих границ, в результате чего получены *удельные* мощности потоков скрытого тепла в МВт/м как функции широты. На рисунке 11 представлены результаты расчета удельных потоков над Мировым океаном. Положительные значения потоков соответствуют направлению переноса тепла на север; положительные значения широт (по горизонтали) – северному полушарию. Кривые красного цвета показывают широтный ход потоков для бореальных лет, голубого – для бореальных зим. Толстой черной линией показан широтный ход среднего летнего потока за все годы; толстой синей – среднего зимнего.

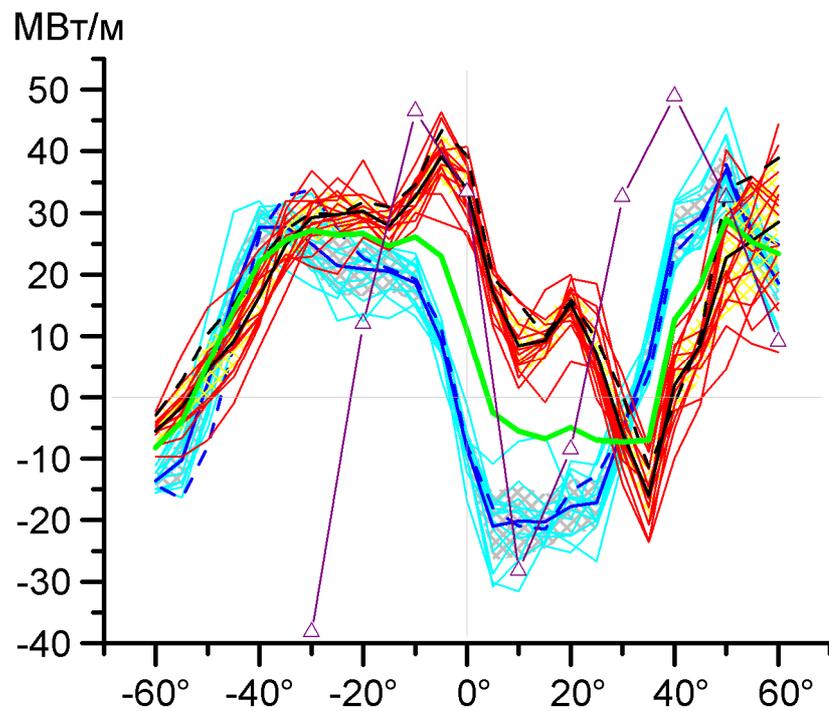


Рисунок 11 – Удельные мощности (МВт/м) меридиональных потоков скрытого тепла как функции широты: голубые кривые – средние «зимние» потоки, красные кривые – средние «летние» потоки; пунктирная синяя кривая – средний поток зимы 2016/2017 г., пунктирная черная кривая – средний поток лета 2017 г.; толстая синяя кривая – средний «зимний» поток за все годы, толстая черная кривая – средний «летний» поток; толстая зеленая кривая – средний поток за непрерывный интервал наблюдений 2003 – 2016 гг.; треугольники – пересчет данных [Пальмен-Ньютон, 1973].

Диагонально заштрихованные области отображают среднеквадратичный разброс значений за все годы для лета (желтая штриховка) и зимы (серая штриховка). Отдельно на графиках выделены широтный ход удельных потоков скрытого тепла для лета 2017 г. (пунктирная черная линия) и зимы 2016/2017 г. (пунктирная синяя линия). Кривые, относящиеся к сезонам «зима» и «лето» образуют две компактные группы, хорошо разделяющиеся на графике и характеризующиеся сравнительно небольшой внутригрупповой дисперсией. Общая картина более симметрична относительно экватора в «зимний» сезон: потоки тепла до 30° северной широты отрицательны (направлены на юг), а потоки в южной тропической зоне направлены на север, в обоих случаях – к экватору, формируя внутритропическую зону конвергенции (ВЗК).

Группа кривых, соответствующих «летним» потокам, проходит на графике параллельно «зимней» группе, но правее и выше нее. В [Пальмен, Ньютон, 1973] указано, что в среднем конденсация преобладает над испарением в северном полушарии, а испарение над конденсацией – в южном. Для компенсации этой разницы необходим поток водяного пара из южного полушария в северное, соответствующий переносу примерно $1,647 \times 10^{16}$ кг воды в год (или около 1,3 ПВт мощности потока скрытого тепла). Исходя из построенных графиков, можно сделать предположение, что этот процесс интенсифицируется в «летний» сезон. Широтный сдвиг между группами «зимних» и «летних» потоков хорошо отражает сезонную миграцию ВЗК.

Дополнительно на графике рисунка 11 построен широтный ход удельных мощностей потоков скрытого тепла, осредненных за все время наблюдений, исключая неполный 2017 г., (зеленая кривая). Пересечение этой кривой с уровнем нулевых потоков приходится на 5° северной широты, что хорошо соответствует среднему положению термического экватора, а среднее значение потока через географический экватор – положительное, что соответствует переносу скрытого тепла на север. За вычетом этой положительной «добавки» порядка 11 МВт/м также хорошо видна характерная симметричная структура потоков, направленных к экватору в тропических широтах. Нужно отметить, что полуширина ВЗК, оцененная из соображений «симметрии» построенной кривой средних потоков, оказывается значительно больше ожидаемой – порядка 40° в каждом полушарии. Одна из возможных причин такого результата обсуждена выше и заключается в том, что существенным фактором адвекции скрытого тепла в средних широтах могут быть маломасштабные турбулентные процессы, анализ которых требует построения рядов данных более высокого пространственно-временного разрешения. С другой стороны, исследования последних десятилетий позволяют говорить о том, что в многочисленных сериях независимых спутниковых наблюдений выявляется тенденция «расширения тропиков», способная сказаться на ширине ВЗК в сторону некоторого ее увеличения.

Глава 6 посвящена описанию разработанного под руководством и при непосредственном участии автора геопортала спутникового радиотепловидения. Как показано в предыдущих главах диссертации, подход спутникового радиотепловидения без ограничения применим к исследованию различных мезомасштабных и синоптических процессов. Однако иллюстрация его применения вынужденно ограничена несколькими конкретными примерами. Поэтому высокую актуальность приобретает задача эффективного информационного обеспечения широкого научного сообщества результатами расчетов динамики атмосферных полей за длительные интервалы наблюдений. Решение этой задачи осуществлено путем создания геопортала спутникового радиотепловидения, развернутого на серверах ФИРЭ РАН.

В **параграфе 6.1** сформулирована общая концепция построения геопортала на принципах виртуальной интеграции распределенных источников спутниковой информации. **Параграф 6.2** содержит общее описание предоставляемых геопорталом типов данных и сервисов для удаленной работы с ними. Концепцию генерации продуктов обработки в интерактивном режиме по запросу пользователя иллюстрирует схема базовой архитектуры геопортала, приведенная на рисунке 12.

Геопортал оснащен базовыми сетевыми сервисами, типологически соответствующими стандартным инструментам предварительного просмотра и поиска и заказа данных. Функции просмотра соответствует динамическая визуализация данных в режиме потокового видео, просматриваемого в видеоплеере. Режим визуализации позволяет выполнить предварительный экспресс-анализ данных, отбор временных интервалов, зон интереса, выбор и локализацию конкретных объектов исследования.

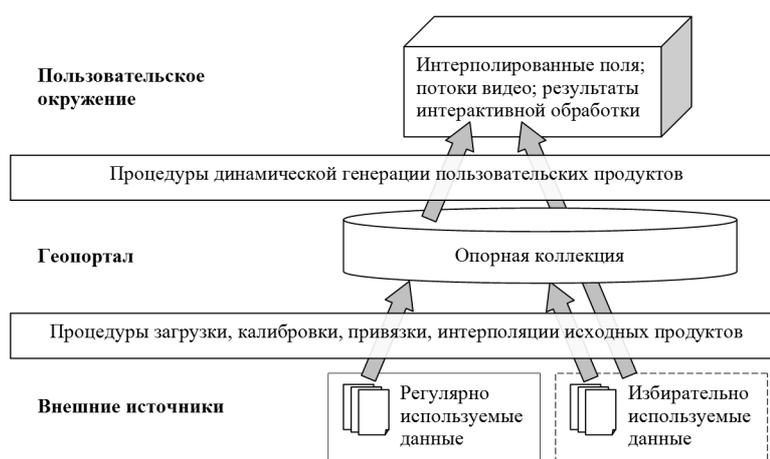


Рисунок 12 – Базовая архитектурная схема геопортала; переход между уровнями данных, соответствующими внешним источникам, серверам геопортала и пользовательскому окружению, осуществляется с помощью специализированных процедур геопортала.

Функция поиска и заказа полей дополнена элементами управления, позволяющими более точно установить время наблюдений, рисунок 13. После выбора времени и типа продукта пользователь инициирует поиск и генерацию данных выбором типа интерполяции (loc, ltw, utc, см. выше) с помощью кнопок справа от окна изображения. Готовый продукт выводится в окно изображения и может быть сохранен в файл на компьютере пользователя.



Рисунок 13 – Страница заказа пользовательских продуктов (интерполированных геофизических полей атмосферы над Мировым океаном) геопортала спутникового радиотепловидения.

Архитектурная ориентированность геопортала на динамическую генерацию пользовательских продуктов и реализованный базовый инструментарий открывают перспективы развития принципиально новых сетевых сервисов, как с точки зрения расширения номенклатуры конечных продуктов, так и с точки зрения организации работы удаленных пользователей с распределенными данными ДЗЗ. В качестве такового, в **параграфе 6.3** рассмотрен инструмент удаленной работы с данными ИКАР (Интерактивный Калькулятор для Атмосферных Расчетов). Была предложена и реализована идея калькулятора над таблично описанными данными. В основу было положено предположение о том, что все пространственные данные, потенциально используемые в проекте ИКАР, имеют привязку по времени и могут быть интерполированы на общую расчетную сетку. Вычисления, задаваемые вводимой в текстовом виде формулой, производятся независимо в каждом узле сетки. В результате формируется массив значений, которые, для удобства визуализации, с помощью линейного преобразования приводятся к диапазону от 0 до 250 и округляются до целых, после чего отображаются на экране в виде растрового изображения с заданной цветовой палитрой и могут быть сохранены на компьютер пользователя в файл стандартного формата.

Коэффициенты калибровки сохраняются в том же файле, как подробно описано в документации на странице проекта ИКАР, для возможности обратного пересчета к калиброванным значениям. Примеры удаленной работы с помощью сервиса ИКАР приведены на рисунке 14.

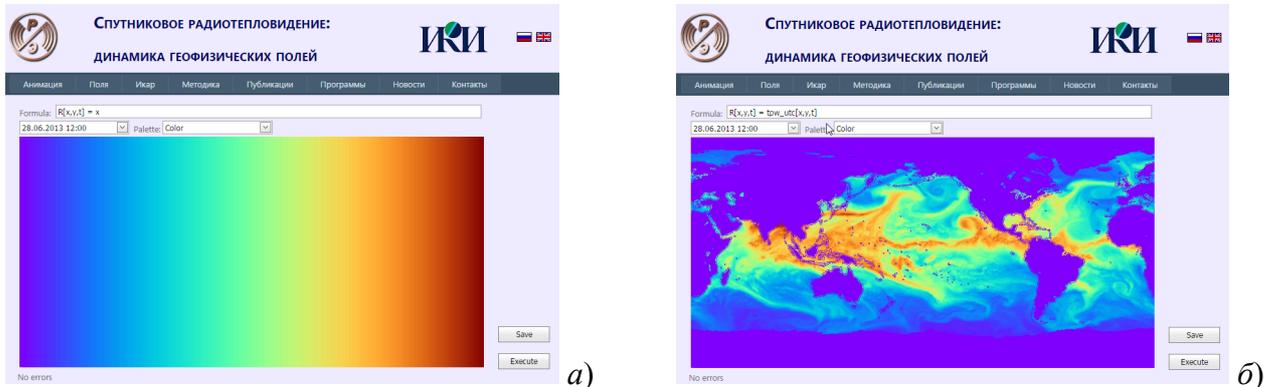


Рисунок 14 – Визуализация расчета *а)* поля, монотонно возрастающего по долготном направлении; *б)* поля интегрального влагосодержания над океаном с заполнением лакун между полосами сканирования

По результатам описанных выше работ автором были получены четыре свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты** диссертационной работы:

1. По предложенной и реализованной схеме интерполяционной обработки радиотепловых спутниковых данных выполнена обработка пятнадцатилетних рядов данных на основе глобальных измерений приборами SSM/I (спутники F13, F14, F15 серии DMSP), SSMIS (спутники F16, F17, F18 серии DMSP), Windsat (Coriolis), AMSR-E (Aqua), AMSR-2 (GCOM-W1). Показано, что обеспечиваемая реализованной схемой точность восстановления удовлетворительна для широкого спектра практических и фундаментальных применений. Проведено сопоставление полей интегрального влагосодержания атмосферы, восстановленных (без интерполяции) по данным измерений радиометром SSMIS со спутника F17 серии DMSP (США) и оптимально синхронизированных с ними по реализованной схеме обработки полей той же величины, исходно восстановленных по данным аналогичного прибора SSMIS на спутнике F16. Средняя невязка при выборке порядка 10^7 значений, равномерно распределенных по месту и времени на месячном интервале измерений, составила $0,8 \text{ кг/м}^2$ (при диапазоне возможных значений от 0 до 75 кг/м^2), что близко к инструментально-алгоритмической погрешности восстановления данной величины (около $0,5 \text{ кг/м}^2$) непосредственно из радиотепловых измерений. Путем численного моделирования, а также сопоставления интерполированных полей

интегрального влагосодержания атмосферы с данными независимых наблюдений за тропическими циклонами подтверждена удовлетворительная (в пределах погрешности определения центра тропического циклона в радиотепловом поле) точность восстановления краткосрочной динамики полей интегрального влагосодержания атмосферы на мезо- и синоптических пространственных масштабах. **Перечисленные результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №1**.

2. Предложена и реализована в замкнутом виде относительно входных спутниковых данных методика расчета адвективных (горизонтальных) потоков атмосферного скрытого тепла. Благодаря этому, в частности, достигнута уникальная возможность независимой проверки и уточнения ряда теоретических оценок и предположений, до настоящего времени не имевших статистически обеспеченных экспериментальных подтверждений. **Эти результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №2**.
3. С помощью реализованной методики детального анализа полей интегрального влагосодержания атмосферы на примере более 10 тропических циклонов (ТЦ) показана связь эволюции ТЦ с адвекцией скрытого тепла из окружающей атмосферы к центру ТЦ: конвергентные (сходящиеся к центру) потоки тепла соответствуют интенсификации ТЦ, а дивергентные – диссипации. Вычисленные максимумы конвергентных потоков скрытого тепла (единицы Петаватт) на один-два порядка превосходят оценки для соответствующих вертикальных потоков от океана к ТЦ, принципиально согласуются с известными модельными представлениями и хорошо объясняют общий энергетический баланс ТЦ. С помощью реализованной методики применения сложных динамических контуров рассчитаны адвективные потоки скрытого тепла, организованные системой взаимодействующих тайфунов-близнецов, и показано, что они определили характер эволюции рассмотренной системы. **Перечисленные результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №3**.
4. С помощью реализованной методики совместного анализа полей интегрального влагосодержания атмосферы и композитных полей температуры поверхности океана на примере исследования урагана Alberto (2000), супертайфуна Haiyan (2013) и тропического шторма Podul (2013) показано, что в условиях почти идентичного состояния океана сценарии эволюции ТЦ могут существенно различаться (от быстрой интенсификации до квазистационарного режима и диссипации) в зависимости от величины и знака атмосферной адвекции скрытого тепла. **Результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №4**.
5. Предложенная методика обработки спутниковых радиотепловых дистанционных данных, основанная на совокупности реализованных алгоритмов спутникового радиотепловидения, позволила преодолеть основные трудности анализа нитевидной структуры глобальной

атмосферной циркуляции и исследования атмосферных рек: фрагментации объектов исследования вследствие их значительной зональной протяженности и расхождения полос спутникового сканирования; пространственно-временного совмещения полей различных геофизических параметров для их совместного анализа; необходимости получения количественной информации о формируемых атмосферными реками потоках скрытого тепла. **Этот результат доказывает** вынесенное на защиту **положение №5**.

6. Выполненный на основе подхода спутникового радиотепловидения анализ глобальной атмосферной циркуляции на временном интервале 2003 – 2017 годов реалистично воспроизвел многие ее характерные элементы и параметры, такие как: зональную структуру, границы ячеек циркуляции, преобладание зонального переноса над меридиональным и характерные скорости и направления адвекции в нижней тропосфере над всеми акваториями Мирового океана; годовые и сезонные вариации, проявляющиеся в миграции границ внутритропической зоны конвергенции и гармониках потоков скрытого тепла с периодами 0,033 месяца (сутки), 6 и 12 месяцев; среднее положение термического экватора на уровне 5° северной широты, конвергенцию потоков скрытого тепла в экваториальной зоне, средний положительный поток скрытого тепла из южного полушария в северное. Таким образом, показано, что информация обо всех указанных свойствах атмосферной циркуляции непосредственно содержится в данных спутниковых наблюдений и может быть извлечена из них с помощью подхода спутникового радиотепловидения. Построены широтные распределения среднегодовых и сезонных меридиональных протоков скрытого тепла над Мировым океаном в целом, а также Тихим, Атлантическим и Индийским океанами. Полученные распределения находятся в качественном согласии с известными данными моделирования, а также с отмечаемой в ряде работ климатической тенденцией «расширения тропиков». **Эти результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №6**.
7. Разработанный и созданный геопортал спутникового радиотепловидения (<http://fire.fryazino.net/tpw/>) реализует процедуры удаленной работы с глобальными полями ряда геофизических характеристик системы «океан-атмосфера» (интегральное влагосодержание атмосферы, полный водозапас облаков, скорость приводного ветра и т.д.) в непрерывном интервале наблюдений 2003 – 2017 гг. при полном пространственном покрытии акваторий Мирового океана на сетке 0,25°, а также интерактивной совместной обработки этих данных с информацией из других открытых источников средствами виртуальной интеграции. Перспективы использования геопортала связаны, в частности, с возможностью эффективной взаимной калибровки данных различных спутниковых приборов (в том числе, отечественных спутниковых радиометров серии МТВЗА), а также комплексного экспресс-анализа атмосферных процессов с помощью реализованных

процедур динамической обработки и визуализации интегрированных в портал данных. **Указанные результаты доказывают** вынесенное на защиту **положение №7**.

Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука. 1974. 187 с.
2. Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. «Космос-243» – первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 14–25.
3. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. М.: Наука. 2005. Т. 2. С. 36–173.
4. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНАД. 2016. 336 с.
5. Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы. М.: Изд-во МГУ. 2012. 408 с.
6. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы : в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
7. Gaikovich K.P. Simultaneous solution of emission transfer and thermal conductivity equations in the problems of atmosphere and subsurface radiothermometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. N. 4. P. 885–889.
8. Kadygrov E.N., Shur G.N., Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // Radio Science. 2003. V. 38. N. 3. 8048. P. 13.1–13.12.
9. Nerushev A.F., Kramchaninova E.K. Method for determining atmospheric motion characteristics using measurements on geostationary meteorological satellites // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. N. 9. P. 1104–1113.
10. Velden C.S., Hayden C.M., Nieman S.J., Menzel W.P., Wanzong S., Goerss J.S. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. V. 78. N. 2. P. 173–195.
11. Wimmers A.J., Velden C.S. Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar orbiting satellites // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2011. V. 50. N. 5. P. 1024–1036.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. **Ермаков Д.М.**, Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н. Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан-атмосфера на базе программной платформы Stream Handler // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 9–16. (РИНЦ)
2. **Ермаков Д.М.**, Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В. Поиск источника энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования // Исследования Земли из космоса. 2012а. № 4. С. 47–56. (РИНЦ) (**Ermakov D.M.**, Chernushich A.P., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V. Searching for an energy source of the intensification of tropical cyclone Katrina using microwave satellite sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. N. 9. P. 963–973) (**WoS, Scopus**)
3. **Ермаков Д.М.**, Чернушич А.П., Шарков Е.А. Детализация фаз развития ТЦ Katrina по интерполированным глобальным полям водяного пара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 2. С. 207–213. (РИНЦ)
4. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Покровская И.В., Чернушич А.П. Обнаружение энергетических источников в перемежаемых режимах интенсивности ТЦ Alberto при его эволюции по данным спутникового микроволнового зондирования // Исследования Земли из космоса. 2013а. № 4. С. 39–49. (РИНЦ) (**Ermakov D.M.**, Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P.. Revealing the energy sources of alternating intensity regimes of the evolving Alberto tropical cyclone using microwave satellite sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. N. 9. P. 974–985) (**WoS, Scopus**)
5. **Ермаков Д.М.**, Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исследование Земли из космоса. 2013б. № 4. С. 72–82. (РИНЦ)
6. **Ермаков Д.М.**, Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Проблемы построения радиотепловых полей достаточной однородности при высоком пространственном разрешении по спутниковым измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013в. Т. 10. № 1. С. 24–33. (РИНЦ)
7. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Возможности количественного описания мезомасштабных процессов в атмосфере на основе анимационного анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014а. Т. 11. № 4. С. 153–162. (РИНЦ)

8. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Оценка тропосферных адвективных потоков скрытого тепла над океаном при анимационном анализе радиотепловых данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2014б. № 4. С. 32–38. (РИНЦ)
9. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 2014в. № 4. С. 3–15. (РИНЦ)
10. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Оценка точности интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 77–88 (РИНЦ, **Scopus**)
11. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Мультисенсорный алгоритм спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. 2016а. № 3. С. 37–46. (РИНЦ) (**Ermakov D.M.**, Sharkov E.A., Chernushich A.P. A multisensory algorithm of satellite radiothermovision // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. N. 9. P. 1172–1180) (**WoS, Scopus**)
12. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Спутниковое радиотепловидение на синоптических и климатически значимых масштабах // Исследование Земли из космоса. 2016б. №5. С. 3–9. (РИНЦ) (**Ermakov D.M.**, Sharkov E.A., Chernushich A.P. Satellite radiothermovision on synoptic and climatically significant scales // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. N. 9. P. 973–978) (**WoS, Scopus**)
13. **Ермаков Д.М.**, Чернушич А.П., Шарков Е.А. Геопортал спутникового радиотепловидения: данные, сервисы, перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 46–57. (РИНЦ, **Scopus**)
14. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Анализ эволюции системы взаимодействующих тайфунов с помощью спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. 2017а. № 2. С. 77–87 (РИНЦ) (**Ermakov D.M.**, Sharkov E.A., Chernushich A.P. Satellite radiothermovision analysis of the evolution of a system of interacting typhoons // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. N. 9. P. 945–954) (**WoS, Scopus**)
15. **Ермаков Д.М.**, Шарков Е.А., Чернушич А.П. Циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли: анализ 15 лет радиотепловых спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017б. Т. 14. № 6. С. 9–27. (РИНЦ, **Scopus**)
16. **Ермаков Д.М.**, Чернушич А.П. Текущие возможности геопортала спутникового радиотепловидения и некоторые итоги проекта «ИКАР» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017а. Т. 14. № 7. С. 321–324. (РИНЦ, **Scopus**)

17. **Ермаков Д.М.** Глобальная циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли по данным спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. 2018. №3. С. 3–28. (РИНЦ)

Статьи в других рецензируемых периодических научных изданиях

18. **Ермаков Д.М.** Использование информации о тропосферной динамике при радиотепловом дистанционном зондировании вертикального профиля влажности атмосферы [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2017а. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/15/text.pdf>. (РИНЦ)
19. **Ермаков Д.М., Чернушич А.П.** Развитие сетевых сервисов геопортала спутникового радиотепловидения // Электронные библиотеки. 2017б. Т. 20. № 1. С. 50–76. (РИНЦ)

Публикации в трудах международных конференций

20. **Ermakov D., Chernushich A., Sharkov E., Shramkov Ya.** Stream Handler system: an experience of application to investigation of global tropical cyclogenesis [Электронный ресурс] // Proc. of 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, 10-15 April, 2011. 2011. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/ISRSE-34/211104015Final00456.pdf>. (РИНЦ)
21. **Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P.** Satellite radiothermovision of atmospheric mesoscale processes: case study of tropical cyclones // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. 2015. V. XL. N. 7/W3. P. 179–186 (РИНЦ, **WoS, Scopus**)
22. **Ermakov D.M.** Investigation of the features of long-term global atmospheric circulation via satellite radiothermovision // Proc. of 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). 2017. P. 413–418. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261775. (РИНЦ, **WoS, Scopus**)

Публикации в трудах Всероссийских конференций

23. **Ермаков Д.М.** Климатология атмосферных рек: возможности спутникового радиотепловидения // Труды VII Всероссийских Армандовских чтений: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ. 2017б. С. 207–215. (РИНЦ)