

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи

Гончаренко Игорь Владимирович



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИИ АТЛАНТИЧЕСКОГО
ОКЕАНА

Специальность 25 00 28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

1 6 1104 2008

Москва 2008

Работа выполнена в Институте Океанологии им П П Ширшова РАН

Научные руководители

доктор физико-математических наук,
профессор Пелевин Вадим Николаевич
кандидат физико-математических наук
Ростовцева Вера Владимировна

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук
кандидат географических наук

А Ф Нерушев
В М Хан

Ведущая организация

Институт Физики Атмосферы
им А М.Обухова РАН

Защита состоится "26" 06 2008 г в 12 час 00 мин на заседании
Диссертационного совета Д 002 239 02 при Институте
Океанологии им П П Ширшова РАН по адресу 117997, Москва,
Нахимовский проспект, 36, Большой Конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Океанологии им
П.П Ширшова РАН

Автореферат разослан "23" 06 2008 г

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

 А.И Гинзбург

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Исследование процессов, приводящих к возникновению тропических циклонов (ТЦ), с целью прогноза зарождения и перемещения этих разрушительных природных образований, является важнейшей научной и практической задачей. Несмотря на многочисленные натурные исследования, проводившиеся в последние десятилетия со спутников, самолетов и судов, а также создание различных прогностических моделей ТЦ, на данный момент нет исчерпывающей картины этого грозного явления природы. Поэтому задача выявления новых взаимосвязей и построения на их основе методов определения районов зарождения ТЦ по оперативной спутниковой информации является актуальной, и решение ее позволит дополнить существующие модели зарождения ураганов и улучшить методику прогноза ТЦ.

Цель работы

Разработка методики оперативного выявления районов возникновения ТЦ на основе анализа данных со спутниковых СВЧ-радиометров, определения их статистических характеристик и связи с вероятностью циклогенеза. С этой целью в работе решались следующие задачи:

- изучение океанологических предпосылок зарождения ТЦ по спутниковым данным,
- разработка принципов построения температурно-влажностного критерия на основе спутниковой СВЧ-радиометрии, изучение его климатологии,
- разработка методологии и программной реализации вычисления полей критерия, построенного по данным СВЧ-радиометрии, исследование его эффективности,
- исследование корреляционной связи критерия со статистикой реализовавшихся ТЦ,
- поиск путей дальнейшего усовершенствования критерия

Положения и основные результаты, выдвигаемые на защиту

1) Разработан температурно-влажностный критерий зарождения тропических циклонов, определяемый по данным дистанционного зондирования океана, и создана методика и программная реализация его расчета по данным спутниковой СВЧ-радиометрии

2) По спутниковым данным получены распределения величины критерия по акватории Северной Атлантики за 2002 и 2004 годы. С помощью созданных программных приложений, позволяющих оценить временную и пространственную статистику этих распределений, показано, что усредненные значения полей критерия соответствуют климатологии циклогенеза (многолетней статистике зарождения ТЦ)

3) Статистическая обработка данных СВЧ- радиометрии позволила выявить сезонные изменения полей значений критерия. Обнаружена хорошая корреляция между сезонным ходом распределения критерия и данными статистики зарождения ураганов в эти же годы

4) Для анализа эффективности оценки вероятности возникновения ТЦ проведена статистическая обработка распределения значений критерия по областям, характерным для циклогенеза, и сравнение с реализовавшейся частотой зарождения ТЦ в этих же областях. Используя методы корреляционного анализа, найдены коэффициенты регрессии и показано, что коэффициент детерминации близок к 70%

5) В результате посуточного анализа спутниковой информации по выделенной акватории в период активного циклогенеза сформулированы принципы дальнейшей модификации критерия, в частности, предложена модификация критерия, учитывающая облачность

Научная новизна полученных результатов

- В процессе работы получены новые данные и теоретические зависимости, характеризующие влияние на процесс циклогенеза совокупности различных метеопараметров

- Предложен и впервые программно реализован температурно-влажностный критерий с учетом температуры поверхности океана, относительной влажности воздуха и влияния силы Кориолиса по данным СВЧ-сканера типа ТМІ

- Впервые получены характеристики полей температурно-влажностного критерия за несколько дней до зарождения ТЦ и выявлена корреляционная связь с частотой зарождения ураганов

Практическая значимость

Разработана методика, позволяющая оперативно определять области, характеризующиеся повышенной циклоноопасностью. Полученные данные о характеристиках температурно-влажностного критерия в этих областях могут служить весомым дополнением к существующим методам, используемым синоптиками и океанологами для улучшения прогнозов зарождения ТЦ.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов диссертации подтверждена посредством статистической обработки данных, полученных методами спутниковой СВЧ-радиометрии, и сравнением данных статистической обработки с натурными данными международных служб, занимающихся мониторингом поверхности Мирового Океана. Выводы работы не противоречат данным других авторов.

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в работе, получены лично автором. Вклад автора был определяющим при разработке методов получения полей значений критерия по спутниковым данным. Им лично создан программный продукт «Антициклон» для визуализации и обработки данных СВЧ – сканера. Конкретное участие автора заключалось в реализации методов решения поставленных в работе задач, обработке, анализе, интерпретации результатов и сравнения их с натурными данными.

Апробация работы

Основные результаты и положения, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

на XIII Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана Физика атмосферы" (Томск, 2-7 июля 2006г),

на Генеральной Ассамблее Европейского Союза Наук о Земле (European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, April, 15-20, 2007),

а также на семинарах ИОРАН, ИФА РАН и НПО «Тайфун»

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 8 научных публикациях

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 166 наименований. Работа содержит 121 страницу текста, 34 рисунка и 1 таблицу.

Благодарности

Тема диссертации была сформулирована профессором, доктором физико-математических наук Пелевиным Вадимом Николаевичем, которому я признателен за постановку задачи, поддержку и постоянное внимание к работе. Выражаю благодарность доктору географических наук П.О. Завьялову за помощь в процессе выполнения диссертации, а также сотрудникам Лаборатории исследования океана аэрокосмическими средствами, (ныне Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов) за ценные замечания и предложения в ходе выполнения мной работы над диссертацией. Также выражаю благодарность И.В. Черному за полезные консультации по данным спутниковой СВЧ – радиометрии.

Содержание работы

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность решаемой научной задачи, сформулирована цель исследования, кратко изложено содержание диссертации, перечислены полученные результаты.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ сделан обзор литературы, посвященной вопросам образования и развития тропических циклонов. Рассмотрены классификация и основные свойства ТЦ. Изложено состояние проблемы исследований зарождения и развития тропических ураганов. Описаны методы численного и лабораторного моделирования ТЦ. На основе обзора литературы формулируется постановка задачи диссертационной работы, обосновываются использованные методы.

В § 1.1 обсуждаются характеристики и особенности тропических циклонов в разных регионах планеты. Перечислены характерные регионы возникновения и развития ураганов. Рассмотрена принятая классификация ТЦ по интенсивности. Показана структура зарождающегося и развитого ТЦ, временные и энергетические

параметры тропических циклонов Рассмотрены этапы развития исследований в области изучения явления тропического циклона Приведены литературные источники, дающие представление о направлениях и результатах исследований тропической атмосферы и ТЦ, их истории и современном состоянии, указывающих на бурное развитие методов и средств получения данных о метеорологических параметрах, характеризующих ТЦ Исследование процессов возникновения ТЦ прежде всего опирается на изучение структуры возникших ТЦ как метеорологических возмущений Наиболее достоверная картина метеорологических полей в ТЦ получена с помощью специальных самолетов-лабораторий (Гракович В Ф, Ипатов В В, 1983) Однако исследовательские полеты таких самолетов проводились в основном только в центральной области радиусом 200 км зрелых ТЦ и имеются лишь единичные случаи, когда по результатам таких полетов можно восстановить вертикальную структуру ветра, температуры и влажности воздуха

С началом спутниковой эры появилась возможность изучать явление ТЦ с помощью СВЧ-радиометров, измеряющих тепловое излучение Земли и земной атмосферы, что позволило получать данные о метеопараметрах с высоким разрешением практически по всей поверхности исследуемых районов в реальном масштабе времени Тем самым, спутниковые исследования повысили эффективность изучения тропических циклонов и в настоящее время являются наиболее перспективными

В § 1 2 рассматривается использование данных спутниковой СВЧ-радиометрии для изучения процесса циклогенеза Развитие спутниковой СВЧ-радиометрии в мире, как в методическом, так и аппаратном плане идет по следующим направлениям.

Для определения интегральных параметров атмосферы и подстилающей поверхности разрабатываются сканирующие многоканальные СВЧ-радиометры с рабочими частотами в окнах прозрачности атмосферы (сканеры), такие как многоканальный сканирующий СВЧ-радиометр SSM/I (1987) американского спутника DMSP [<http://www.ssmi.com/>] В России первые эксперименты в этом направлении были проведены с помощью СВЧ-сканера Икар-Дельта (1996), установленного на научно-исследовательском модуле "Природа" космической станции "Мир" (Шарков Е А., 1997)

Для температурного и влажностного профилирования атмосферы разрабатываются СВЧ-радиометры, которые обеспечивают спектральные измерения, соответственно, в линиях поглощения кислорода и водяного пара (зондировщики) К данному классу приборов можно отнести, например, СВЧ-зондировщики температуры атмосферы SSM/T-1 (1991) спутника DMSP и MSU (1979) спутника NOAA, а также СВЧ-

зондировщики влажности атмосферы - SSM/T-2 (1991) спутника DMSP (Spencer, R W, W M. Lapenta, and F R Robertson, 1995)

Кроме того, активно разрабатываются и используются спутниковые СВЧ-радиометры нового класса для мониторинга системы океан-атмосфера, совмещающие в себе одновременно функции сканера и зондировщика, например, прибор SSMIS на спутнике DMSP (Bonnamy J J, 1983), AMSU-A (1998) американского спутника NOAA и AMSU-B (1998) спутника NOAA (R M Zehr, M D Goldberg, and S Q Kidder, 2000) и Российские приборы серии МТВЗА (Гранков А Г, Мильшин А А, Черный И В, 2000)

Спутниковая СВЧ-радиометрия активно используется при исследовании параметров отдельных тропических циклонов (Knaff, J A, R M Zehr, M D Goldberg, and S Q Kidder, 2000) По этим работам уточняются поперечные размеры циклонических образований и их структура, определяются скорости образования и распада различных структурных элементов По данным зондировщиков определяются характеристики теплого (холодного) ядра Полученные данные часто используются для верификации численных моделей, а также в различных системах мониторинга этого явления (Митник Л М., 2005)

Таким образом, можно утверждать, что спутниковая СВЧ-радиометрия является наиболее информативным методом изучения процесса циклогенеза над поверхностью Мирового океана

В § 13 рассмотрены подходы к теоретическому исследованию процессов возникновения тропических циклонов Рассматривается введение на основе климатических и метеорологических величин единого параметра - сезонного потенциала генезиса (СПГ) Представлена широко известная концепция механизма развития тропических циклонов, так называемая гипотеза условной неустойчивости второго рода (CISK), связывающая основной источник энергии возмущений - теплоту конденсации водяного пара в мощных конвективных облаках («горячих башнях») - с конвергенцией в атмосферном пограничном слое (Bister M, 2001, Chamey J G, Eliassen A, 1964, Fraedrich K, McBride J L, 1995) Концепция CISK послужила основой многих теоретических работ по анализу условий развития тропических возмущений различных пространственных и временных масштабов Также представлена альтернативная CISK гипотеза, основанная на ветровом механизме усиления тепловых потоков от подстилающей поверхности (WISHE) (Грей В М, 1985, Emanuel K A, 1986, Ramanathan V, Crutzen P J, 2001)

Большое число исследований ТЦ связано с численным моделированием их структуры, эволюции и перемещения. Первые модели появились в начале 60-х годов прошлого века и уже к середине 80-х было создано большое число исследовательских многоуровневых осесимметричных и трехмерных моделей. Однако, примеров успешного моделирования реально существовавших ТЦ сравнительно немного, а в оперативной практике прогноза модели ТЦ практически не применяются. Таким образом, в настоящее время несмотря на значительные успехи при исследовании процессов зарождения ТЦ методами численного моделирования, однозначная физическая интерпретация результатов моделирования невозможна из-за большого числа взаимосвязанных процессов в ТЦ.

Отмечено, что в попытке предсказать возникновение ТЦ свое дальнейшее развитие получил феноменологический подход. На основе информации, полученной в ходе натурных измерений и численных экспериментов, были разработаны различные индексы. Хотя многие из этих индексов включают в себя одни и те же факторы, все они в некоторой степени отличаются друг от друга. Рассмотрены индексы, разработанные Греем (1968), Пальменом (1948), Вордом (1995), ДеМарией (2001).

Недостатком предложенных индексов является невозможность надежного дистанционного измерения параметров, входящих в них. В.Н. Пелевин (2004), используя простую феноменологическую модель, предложил критерий, включающий в себя температуру поверхности океана (ТПО), относительную влажность нижнего слоя атмосферы и параметр Кориолиса. Все параметры, входящие в этот критерий, определяются при мониторинге поверхности океанов с ИСЗ. В данной диссертационной работе решалась задача получения полей распределения значений этого критерия по спутниковым данным, исследование его пространственной и временной статистики и изучение его корреляции со статистикой зарождения ТЦ на примере Атлантического океана.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ, состоящей из двух разделов, рассматриваются океанические предпосылки зарождения тропических циклонов по данным СВЧ – радиометрии. Для исследования был выбран бассейн Северной Атлантики, характеризующийся активным циклогенезом с июля по ноябрь. Была проанализирована информация, полученная со спутников за несколько суток до дня зарождения ТЦ.

В § 2.1 приведена краткая характеристика данных СВЧ – радиометрии, получаемых со спутников. Проанализированы требования к данным о

метеопараметрах, которые предполагается использовать для оперативного и полномасштабного изучения явления циклогенеза. Явление зарождения и развития ТЦ в Северной Атлантике наблюдается в разных районах океана и порой в одни и те же промежутки времени. Таким образом, для оперативного обнаружения и изучения этих процессов необходимо вести наблюдение за всем бассейном Северной Атлантики. ТЦ – это огромные вихри, достигающие в диаметре 1000-1500 км. Однако, при зарождении ТЦ как правило имеют диаметр ~ 200-300 км. Для того, чтобы иметь возможность изучать структуру таких образований необходимо иметь метеоданные с разрешением не хуже чем $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (~25 км). Период зарождения составляет обычно три-пять суток. Чтобы иметь достаточное для анализа явления количество данных, необходимо получать их не реже одного-двух раз в сутки.

Был проведен подбор подходящих для данной работы спутниковых данных, в результате которого выбор пал на зондировщик ТМІ, установленный на спутнике TRMM.

Для анализа процесса циклогенеза в бассейне Северной Атлантики были использованы данные с официального сайта Remote Sensing Systems (www.ssmi.com), где представлены результаты измерений, произведенные выбранным нами спутником TRMM, за каждый год, начиная с 1997 года. При этом, доступны три вида бинарных (двоичных) типа данных: 1) данные за один день, 2) данные за три дня, 3) данные за месяц. В работе были использованы только данные за один день. Каждый ежедневный двоичный файл данных, доступный с ftp сайта Remote Sensing Systems состоит из четырнадцати карт метеопараметров с сеткой $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ соответствующей 1440×320 байт. Семь карт соответствует восходящему движению спутника: 1) время (t) от 0 до 1440 мин, 2) температура поверхности океана (ТПО) (S) от -3 до $34,5^{\circ} \text{C}$, 3) скорость ветра на высоте 10 метров над уровнем океана, зафиксированная на частоте 11 GHz (Z) от 0 до 50 м/с, 4) скорость ветра на высоте 10 метров над уровнем океана, зафиксированная на частоте 37 GHz (W) от 0 до 50 м/с, 5) атмосферный водяной пар (V) от 0 до 75 мм, 6) облака, содержащие воду в жидкой фазе (L) от 0 до 2,5 мм, 7) осадки в виде дождя (R) от 0 до 25 мм/ч. Затем следует семь карт, соответствующих нисходящему движению спутника.

В § 2 проведен анализ изображений с ИСЗ с целью определения эффективности использования отдельных метеопараметров для оценки возможности зарождения ТЦ. Получаемые со спутникового радиометра поля значений температуры поверхности океана, количества водяного пара, осадков и приводного ветра отличаются большой

изменчивостью Однако, как показал анализ этой информации, эти значения не могут быть использованы в качестве надежного источника информации о месте и времени зарождения очередного ТЦ В результате проведенных изысканий был сделан вывод о необходимости рассматривать метеопараметры не по отдельности, а в некоторой комбинации

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены особенности формирования критерия для определения места и времени зарождения ТЦ по данным спутниковой СВЧ радиометрии

В § 3.1 изложены основные принципы построения критерия В предыдущей главе было показано, что хотя ни один из параметров, получаемых при СВЧ-мониторинге системы океан-атмосфера со спутников, не позволяет однозначно определять вероятность возникновения ТЦ, но при приближении события зарождения ТЦ происходят определенные изменения большинства из них Для построения феноменологического критерия были выбраны параметры, которые могут быть оценены методами спутниковой СВЧ-радиометрии T – температура поверхности океана, k – относительная влажность воздуха у поверхности воды, f_c – параметр, пропорциональный горизонтальной составляющей силы Кориолиса, рассчитанный по координатам точки наблюдения

В качестве упрощенной феноменологической модели процесса зарождения ТЦ, объясняющей, почему именно эти параметры были выбраны, и позволяющей получить вид критерия, была рассмотрена следующая модель Тропический циклон представляет собой процесс быстрого подъема теплого и влажного воздуха, накопившегося в пограничной зоне у водной поверхности, к тропопаузе (12-14 км), в результате которого огромное количество влаги оказывается на больших высотах, перемещается и затем выпадает в виде мощных осадков При этом восходящий поток воздуха закручен вокруг вертикальной оси Наблюдается большая тангенциальная составляющая скорости ветра при относительно малых радиальной и вертикальной составляющих Для реализации явления тропического циклона необходим запас потенциальной энергии, которая только и может перейти в кинетическую энергию экстремальных скоростей ветра Эта потенциальная энергия накапливается в атмосфере над океаном постепенно, до начала формирования циклона, и ее источником в наиболее общем смысле является солнечная энергия

Поток солнечной энергии нагревает верхний слой океанской воды От водной поверхности нагревается воздух, происходит интенсивное испарение (так называемый

«поток скрытого тепла»), и в результате пограничный слой 1-2 км заполняется теплым и влажным воздухом (по измерениям, относительная влажность на высоте 10 метров над поверхностью достигает 85-100%) Если такой приповерхностный слой воздуха начнет подниматься, то при определенных условиях влага сыграет роль «топлива», поскольку значительное тепло выделяется во время ее конденсации при подъеме Таким образом, первым условием возникновения ТЦ является наличие предпосылок, позволяющих теплому и влажному воздуху подняться к тропопаузе, то есть наличие предпосылок возникновения сквозьтросферной конвекции Другими словами, необходимо наличие условий, при которых зона влажнотростойчивости атмосферы простирается от поверхности воды до тропопаузы

Вторым условием является наличие механизма перемещения к месту возникновения сквозьтросферной конвекции теплового и влажного приповерхностного воздуха из окружающих районов, обеспечивающего возможность устойчивого существования структуры ТЦ в течение длительного времени Такой «подсос» возникает в районах, где в результате действия сил Кориолиса происходит закручивание устремляющихся в центр потоков воздуха

В § 3.2 говорится о влиянии температуры и влажности воздуха в приповерхностном слое океана на возможность сквозьтросферной конвекции Рассмотрены физические процессы, происходящие при перемещении некоего объема воздуха с какого-либо нижнего горизонта на верхний горизонт Представлены теоретические обоснования возможности подъема пробного объема по влажной и сухой адиабатам вплоть до тропопаузы, результаты сопоставлены с кривой стратификации экваториальной тропосферы, полученной в результате измерений на судах Института океанологии РАН «Академик Курчатов» и «Профессор Штокман» в многомесячной экспедиции ПИГАП (рис 1) Проведенные расчеты позволили определить область значений температуры поверхности океана и относительной влажности воздуха у поверхности, при которых возможна сквозьтросферная конвекция (рис 2) Определена граница площадь справа от кривой, изображенной на рисунке представляет собой зону, где возможно возникновение сквозьтросферной конвекции, а следовательно создаются условия для формирования ураганов, а слева - зона параметров T_s и k_s , где ураганы невозможны Хорошо видно влияние влажности на возможность сквозьтросферной конвекции Так, при температуре поверхности ниже $22,5^{\circ}\text{C}$ сквозьтросферная конвекция невозможна при любой влажности – «рабочего» вещества для приведения всей этой машины в действие недостаточно При

температуре поверхности 25°C для возникновения условий формирования ТЦ необходима относительная влажность более 82%, что вполне реально, в то время как при температуре в нижнем слое $27,5^{\circ}\text{C}$ требования к величине влажности снижаются (не менее 65%)

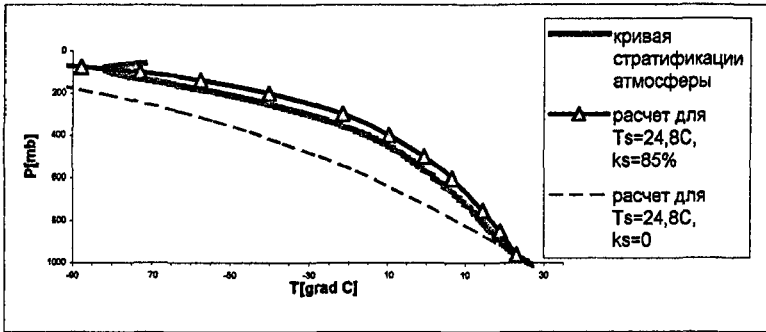
Были проанализированы условия зарождения ураганов в Атлантике в 2002 и 2004 годах. По данным спутниковых СВЧ-радиометров на день зарождения каждого ТЦ были рассчитаны средняя температура поверхности океана и средняя влажность атмосферы в квадрате $10^{\circ}\times 10^{\circ}$. Результаты нанесены на фазовую плоскость «ТПО - относительная влажность» (рис 2). Видно, что полученная из общих соображений кривая, ограничивающая область возможного зарождения ТЦ, хорошо отражает закономерности процесса возникновения ураганов. Все точки, соответствующие параметрам реальных ТЦ 2002 и 2004 гг. находятся в области «А», где возможно возникновение сквозьтросферной конвекции.

В §3.3 описано формирование температурно-влажностного критерия и проведена оценка его эффективности по климатологическим данным с использованием статистики возникновения ТЦ. Используя полученные зависимости, критерий Ω был сформирован так, чтобы учесть не только температуру, но и влажность приповерхностного слоя атмосферы. В формуле критерия также учтено влияние сил Кориолиса

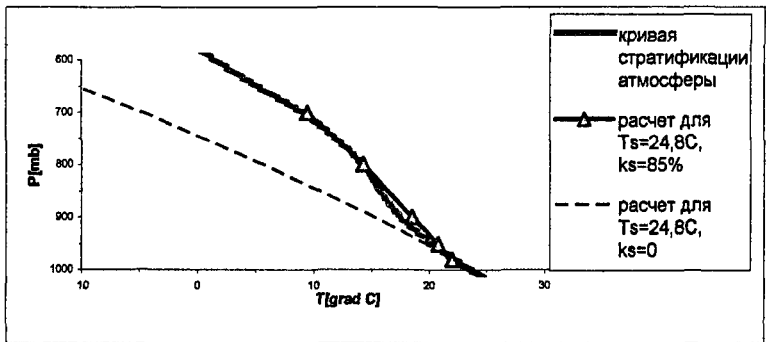
$$\Omega = \begin{cases} \delta(T_s, k_s) \sin\varphi & \text{при } \delta(T_s, k_s) > 0 \\ 0 & \text{при } \delta(T_s, k_s) \leq 0 \end{cases} -$$

$$\delta(T_s, k_s) = (T_s - T_c) / \Delta T_{\max} + (k_s - k_c) / \Delta k_{\max}, \quad T_c = 27,5^{\circ}\text{C}, \quad \Delta T_{\max} = 4^{\circ}, \quad k_{s0} = 67\%, \quad \Delta k_{s\max} = 24\%$$

Климатология введенного критерия исследовалась по данным Атласа океанов (Атлас океанов Атлантический и Индийский океаны - М, 1977). Была проведена оценка $\langle \Omega \rangle$, усредненная за год, последовательно в 5-градусных широтных зонах в двух районах Мирового океана, где наблюдаются существенные различия в широтном распределении частоты зарождения ТЦ. Средняя температура у поверхности воды и относительная влажность определялась по Атласу океанов. Оказалось, что сформулированный таким образом критерий Ω точно отражает широтные закономерности возникновения ТЦ в Индийском океане. Максимум «активности ураганов» согласно критерию Ω лежит в полосе от 10° до 15° ю.ш. и совпадает с реализовавшейся широтой зарождения максимального количества ТЦ.



А



Б

Рис.1. Кривая стратификации атмосферы над океанской поверхностью, измеренная в экваториальной зоне (серая кривая) и кривые состояния, рассчитанные для поднимающегося «пробного» объема сухого воздуха (штриховая кривая) и для поднимающегося «пробного» объема воздуха, относительная влажность которого равняется 85% на уровне 10 метров от поверхности (черная кривая с маркерами). Температура воздуха у поверхности океана 27°C (А) и $24,8^{\circ}\text{C}$ (Б).

В Северной Атлантике из-за теплого течения Гольфстрим повышенная температура водной поверхности распространяется до более высоких широт, и поэтому значения критерия Ω достигают максимальных величин в полосе 20 - 30° с ш, в этом же диапазоне лежат значения максимальной частоты зарождения ТЦ за 16 лет

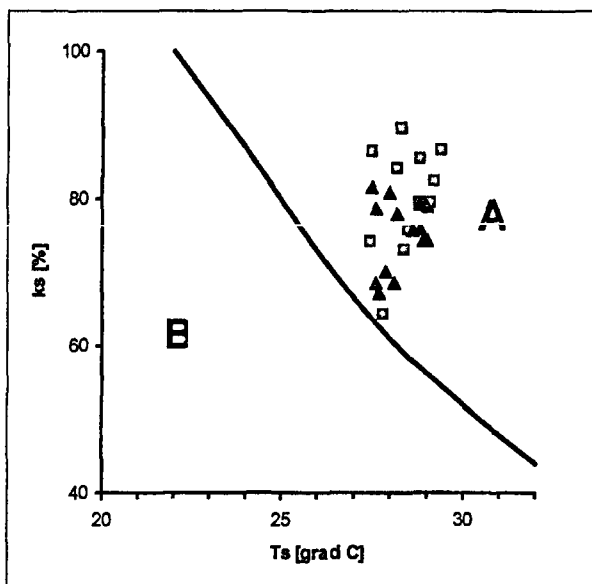


Рис.2. Область значений температуры поверхности океана и относительной влажности воздуха у поверхности, при которых сквозьтросферная конвекция возможна (А) и невозможна (Б). Маркерами показаны значения относительной влажности воздуха у поверхности океана и температуры поверхности океана в момент зарождения ТЦ по данным за 2002(треугольники) и 2004(квадраты) годы.

Полученное совпадение распределения оценок вероятности зарождения ТЦ за длительный период времени и климатологических значений критерия Ω говорит о возможности использования предложенного температурно-влажностного критерия и целесообразности дальнейшего изучения физических принципов, позволивших сформулировать этот критерий. Критерий Ω может быть использован для выявления районов океана, где вероятность возникновения ТЦ в данный момент времени велика.

В § 3.4 описан алгоритм, предложенный для оценки величины температурно-влажностного критерия по данным спутниковой СВЧ радиометрии. Используя программную реализацию этого алгоритма, были получены и проанализированы распределения значений критерия в сезоны ураганов 2002 и 2004 гг. Как было показано в главе 2, распределение по акватории Северной Атлантики метеопараметров, полученных со спутника, не дает возможности однозначного определения района зарождения нового ТЦ. Так, хотя явление ТЦ и сопровождается повышенной влажностью, температурой и ветром, но в тропических акваториях океана данные параметры имеют высокие значения на больших площадях, а ТЦ не развиваются. В противоположность вышесказанному, анализ карт распределения значений критерия дает возможность выделить небольшое число зон повышенных значений критерия.

Эффективность применения нового метода для определения мест зарождения тропических циклонов продемонстрирована на примере распределения предложенного критерия по акватории Северной Атлантики, рассчитанного на 18 сентября 2002 года (рис. 3). Здесь дано изображение северной части Атлантического Океана от экватора до 40° северной широты от побережья Северной и Центральной Америки до западного побережья Африки. Черным цветом показаны лакуны – области, где отсутствуют в этот день данные спутниковых измерений. На изображении мы видим распределение поля значений критерия по поверхности океана. Области повышенных значений критерия, в основном, соответствуют действующим ураганам, а также указывают на то место, где через несколько дней зародится очередной ТЦ. Так, ТЦ KYLE был отмечен американскими метеорологическими службами 21.09.2002 в центральной части Северной Атлантики. На нашем изображении 18.09.2002 и в последующие дни здесь наблюдается область повышенных значений критерия.

Таким образом, использование карт распределения нового критерия позволяет эффективно выделять зоны зарождения новых ТЦ.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ подробно исследованы пространственные и временные свойства распределения критерия, полученного в ходе измерений со спутников в 2002 и 2004 годах.

В § 4.1 рассматривается выделение областей активного циклогенеза в Северной Атлантике с помощью программы усреднения значений температурно-влажностного критерия, полученных по спутниковым данным. Проведенные в данном параграфе расчеты показывают, что высокие средние значения критерия, полученные за

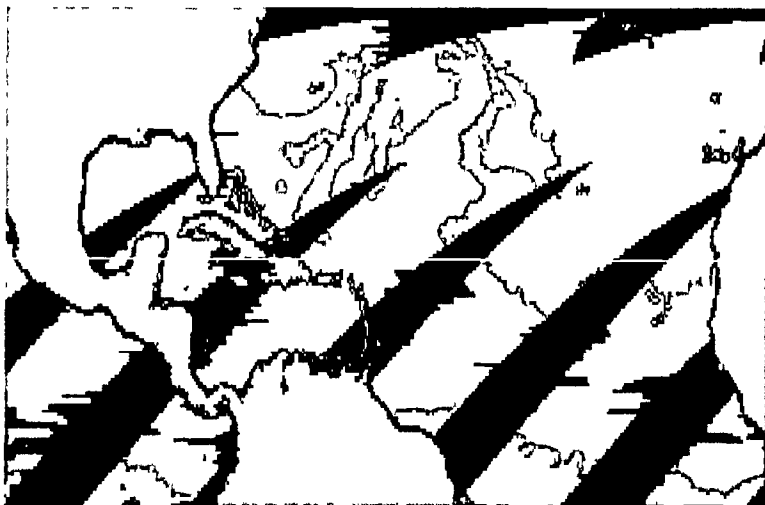


Рис 3 Распределение критерия вероятности зарождения тропических циклонов Ω в северной части Атлантического океана на 18.09.2002, рассчитанное по данным СВЧ радиометрии океана со спутника SSM/I (белые области – значения критерия равны 0, переход от синих областей к зеленым соответствует увеличению значений критерия, черные области – зоны, где отсутствуют спутниковые данные при облете спутником Земли в эти сутки)

конкретный период времени, эффективно выделяют зоны наибольшей активности циклогенеза, а межгодовые изменения его величины коррелируют с интенсивностью циклогенеза в различных сезонах

В § 2 рассмотрено временное распределение значения критерия и произведено его сравнение с сезонным ходом активности циклогенеза (рис 4). По данным, представленным в (Покровская И В, Шарков Е А, 2007), было получено распределение количества зародившихся циклонов по месяцам за 17 лет (1983–2000). Известно, что с января по май, ураганы не зарождаются, а с июня количество ТЦ возрастает и достигает своего максимума в сентябре и спадает к декабрю.

Рассмотренное распределение среднего значения критерия в каждом месяце на примере 2004 года показало, что критерий значительно отличается от нуля в те же месяцы, когда зарождается значительное количество ТЦ. Видно, что распределение среднего

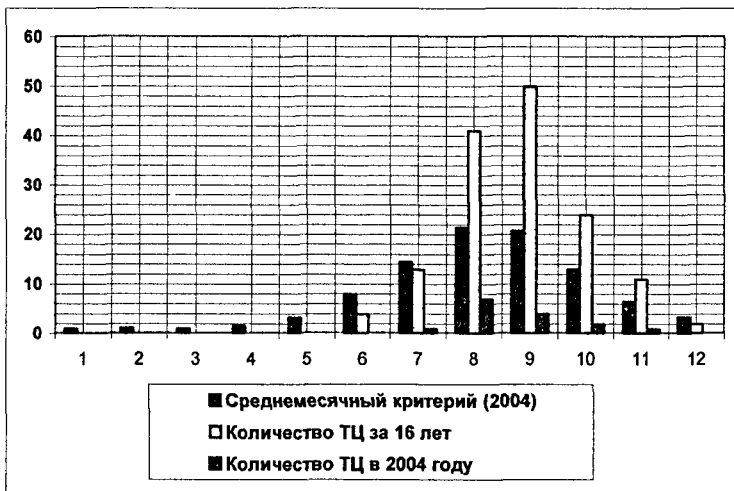


Рис. 4 Сводная гистограмма помесячного распределения значений среднего критерия за 2004 год, распределение количества циклонов с 1983 по 2000 г и количества зародившихся циклонов в 2004

критерия хорошо коррелирует с распределением числа реализовавшихся в том же году ТЦ и, естественно, несколько отличается от результатов многолетней статистики. Эти отличия, однако, проявляются только в августе и сентябре и отражают межгодовые изменения условий зарождения ТЦ.

В § 4.3 описана пространственная статистика распределения температурно-влажностного критерия. Так как очевидно, что делать вывод о возможности зарождения ТЦ по значениям критерия в одном пикселе (25X25км) нецелесообразно, возникает задача получения среднего значения критерия по выбранной площади и оценки его статистики. Для определения оптимального размера области, по которой следует проводить усреднение значений критерия, были рассмотрены распределения температурно-влажностного критерия в районах зарождения всех ТЦ в сезон ураганов 2004 года. В результате анализа размеров областей повышенных значений критерия в месте зарождения ТЦ, был сделан вывод, что явление зарождения урагана целесообразно рассматривать в квадрате $10^0 \times 10^0$.

Далее было получено распределение средних по квадратам значений критерия и проведено сравнение их с частотой образования ТЦ на этой же площади за достаточно длительный промежуток времени. Область, где зарождаются ТЦ, была поделена на квадраты 10 x 10 градусов (рис 5а) и для каждого квадрата было рассчитано среднее значение критерия. Далее в каждом квадрате было подсчитано количество зародившихся за этот же период ТЦ. На рис 5а изображена исследуемая акватория, разбитая на квадраты. Количество зародившихся и прошедших через каждый квадрат ТЦ, проставлено слева от дроби, а среднее значение критерия за этот сезон ураганов – справа от дроби. Видно, что эти значения хорошо коррелируют между собой.

Считая зависимость между этими величинами линейной, был проведен анализ с использованием метода парной линейной регрессии. Пусть количество ТЦ в квадрате является линейной функцией величины среднего критерия ($y=a_0+a_1*x$). Тогда параметры регрессии и ее стандартные отклонения могут быть рассчитаны по известным формулам (например, Брандт, 1975). Используя данные 2004 года, были получены следующие значения этих величин:

$$a_0 = 0,10 \pm 0,18, \quad a_1 = 0,15 \pm 0,03$$

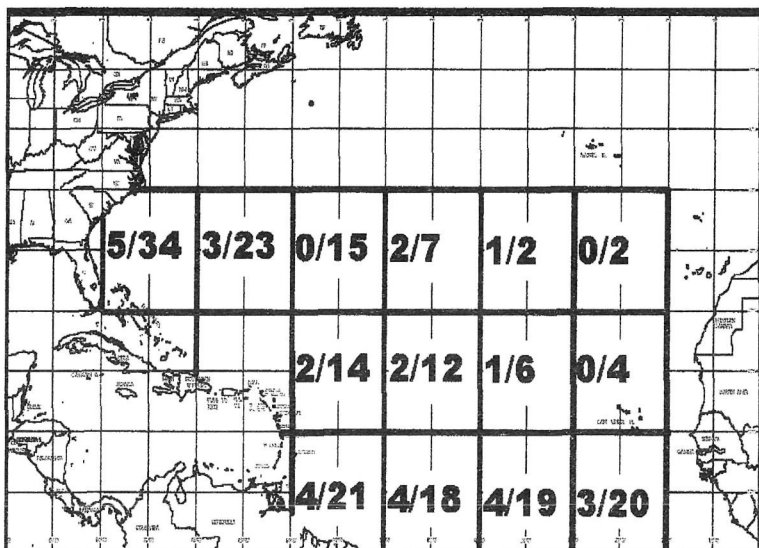
Прямая эмпирической регрессии изображена на рис 5б. Чтобы выяснить, является ли корреляция между числом ТЦ и значением температурно-влажностного критерия значимой, рассматриваются гипотеза $a_1 = 0$ и конкурирующая гипотеза $a_1 \neq 0$. Для принятия той или иной гипотезы рассчитывается эмпирическая значимость t_{a1} и сравнивается с теоретической значимостью. Для значений критерия 2004 года

$$t_{a1} = a_1/\sigma_{a1} = 5,17$$

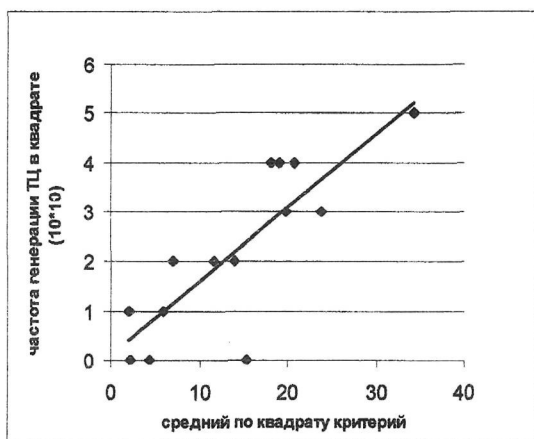
Теоретическая значимость t_p получается по выбранному уровню значимости и количеству степеней свободы. Выбирая уровень значимости равным 5% (т.е. с вероятностью 0,05 мы допускаем отклонение от гипотезы $a_1 = 0$, когда она на самом деле верна), получаем для числа степеней свободы $n=14$ (n - количество квадратов, используемых для оценки) теоретическое значение коэффициента Стьюдента

$$t_{0,05}(n-2) = 2,18$$

Поскольку эмпирическая значимость (5,17) больше теоретической (2,18), коэффициент a_1 значимо отличается от 0, то есть корреляция между числом ТЦ и значением температурно-влажностного критерия является значимой. Этот же вывод подтверждается высоким значением коэффициента детерминации (0,69).



а



б

Рис.5. Распределение по квадратам количества зародившихся и прошедших циклонов и значения среднего критерия в каждом квадрате за сезон ураганов 2004года (а). Корреляция частоты зарождения ТЦ и среднего критерия в квадрате $10^0 \times 10^0$. (б).

Следовательно, существует достаточно сильная корреляция между числом ТЦ и значением температурно-влажностного критерия. Так как вероятность зарождения ТЦ пропорциональна количеству зародившихся ураганов, значение среднего по квадрату критерия хорошо коррелирует с вероятностью зарождения ТЦ.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ проведено исследование динамики посуточного изменения значений критерия, по результатам которого предложена модификация критерия.

В § 5.1 было проанализировано распределение среднего по площади характерного квадрата ($10^0 \times 10^0$) значения критерия в районах активного формирования ТЦ. Анализ показал, что за несколько дней до зарождения ТЦ всегда наблюдаются высокие значения критерия. То есть высокое значение критерия есть необходимое условие для зарождения ТЦ. Однако, наблюдаются также области с повышенным значением критерия, а ТЦ в них не формируются. Это говорит о том, что высокое значение критерия есть необходимое, но не достаточное условие для формирования ТЦ.

Возникает вопрос о возможности, используя имеющиеся спутниковые данные, модифицировать критерий таким образом, чтобы отделять ситуации, не приводящие к зарождению ураганов, от ситуаций, предшествующих возникновению ТЦ.

В § 5.2 в качестве дополнительного фактора для модификации критерия было предложено учитывать ветровую обстановку в зонах зарождения ТЦ, являющуюся, как известно, одним из решающих факторов, влияющих на возникновение ТЦ. Действительно, наличие сильного ветра в средней части тропосферы, отличного от приповерхностного ветра, мешает формированию квазипорядоченных конвективных структур, не позволяет образоваться единому вихрю, поднимающемуся к тропопаузе. Косвенным признаком отсутствия сильного ветра, является формирование довольно плотного облачного покрова. Так как данные, доступные со спутника, не позволяют получить значения разности скоростей ветра напрямую, был использован косвенный признак наличия плотной облачности.

Учитывая все вышесказанное, предложена следующая модификация критерия

$$\Omega = \begin{cases} \delta(T_s, k_s) \sin \varphi CL & \text{при } \delta(T_s, k_s) > 0 \\ 0 & \text{при } \delta(T_s, k_s) \leq 0 \end{cases} -$$

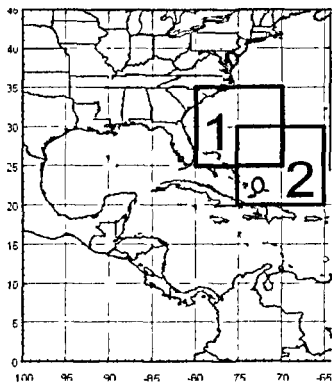
$$\text{где } \delta(T_s, k_s) = (T_s - T_0) / \Delta T_{\max} + (k_s - k_0) / \Delta k_{\max},$$

$$CL = \begin{cases} 1, & \text{если облачность есть} \\ m, & \text{если облачности нет,} \end{cases} \quad 0 < m < 1 -$$

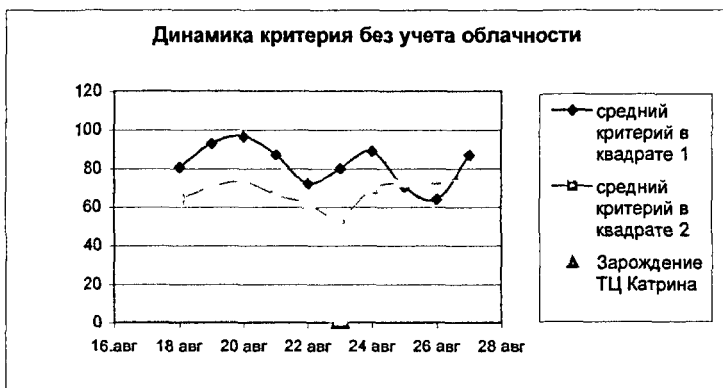
Для расчета величины модифицированного критерия по данным зондировщика ТМІ без привлечения дополнительной информации была создана специальная программа, с помощью которой был проведен посуточный анализ изменений среднего значения модифицированного критерия за длительные (более месяца) промежутки времени в 2002 году. Результаты этой работы подтвердили эффективность предложенного подхода.

В §5.3 предложенная методика использована для исследования зарождения тропического циклона KATRINA (23.08.2005). Было показано, как модифицированный температурно-влажностный критерий позволяет выявить область зарождения конкретного ТЦ. В районе океана к востоку от побережья США рассмотрены две области (рис. 6а): характерный квадрат 1 выбран в районе, где обычно зарождаются ТЦ в сезон ураганов, а квадрат 2 охватывает область, где зародился ураган KATRINA. Анализ изменения средних по квадратам 1 и 2 значений критерия с 18 по 27 августа (рис. 6б) показывает, что за несколько дней до зарождения ТЦ значения критерия в обоих квадратах достаточно высокие, они превышают некоторое пороговое значение среднего критерия, полученное опираясь на данные предыдущего параграфа. При этом согласно таким оценкам в квадрате 1 образование ТЦ более вероятно, чем в квадрате 2. Так, более высокие значения критерия в квадрате 1 показаны на примере распределения поля критерия 19.08.05 (рис. 7а). Учет распределения облачности существенно меняет картину (рис. 7б). Видно, что в квадрате 1, несмотря на большую влажность, облачности практически нет – видимо, ветровая обстановка неблагоприятна, в то время как у Антильских островов наблюдается появление облачности.

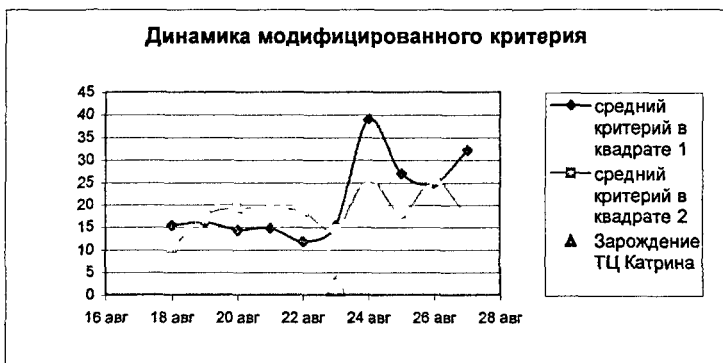
За тот же промежуток времени (18 - 27 августа) были рассчитаны значения модифицированного критерия, учитывающего наличие облачности, и проведено его



а

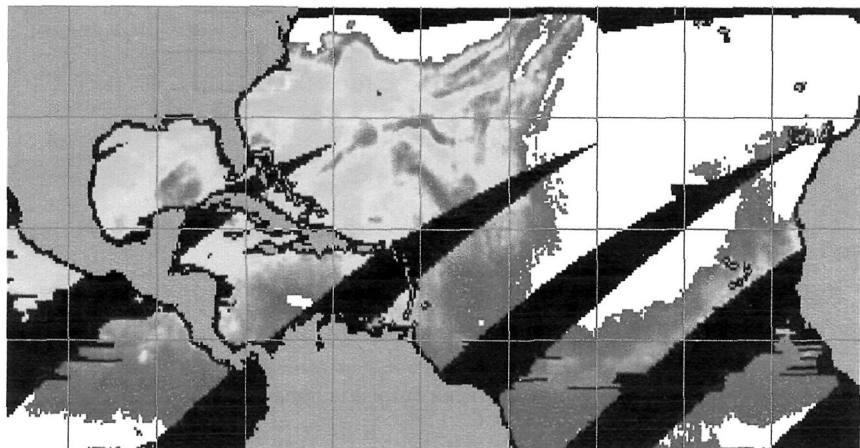


б

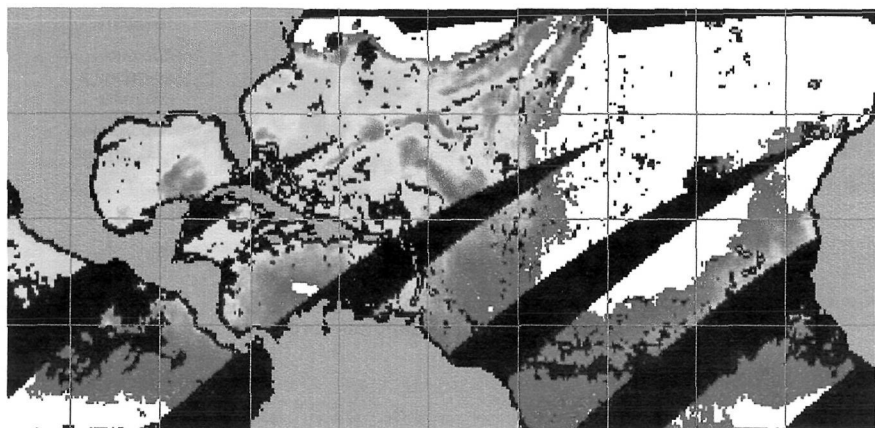


в

Рис. 6. Динамика распределения средних значений температурно-влажностного критерия (б) и модифицированного критерия (в) в характерных квадратах 1 и 2 (а) с 18 по 27 августа 2005г. Красным отмечен район и время зарождения ТЦ KATRINA.



а



б

Рис. 7. Распределение поля значений температурно-влажностного критерия 19.08.05 (за 3 дня до зарождения ТЦ KATRINA) (а). Это же распределение, совмещенное с картой облачности (б).

усреднение по выбранным квадратам (рис.6в). В целом с 19 по 23 августа средние по квадрату значения модифицированного критерия в первом квадрате ниже, чем значения во втором квадрате, то есть образование ТЦ более вероятно в квадрате 2. Видно, что модифицированный критерий более реалистично описывает явления в рассматриваемых областях.

Таким образом, введение модифицированного критерия позволяет учитывать как температурно-влажностные факторы, так и метеорологические условия, необходимые для активной конвекции, что дает возможность более эффективно определять место и время зарождения ТЦ, используя данные спутниковой СВЧ радиометрии

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены основные результаты проведенной работы

Основные результаты

- 1) Исследованы закономерности изменения параметров, определяемых оперативно по данным спутниковой СВЧ-радиометрии, в период зарождения ТЦ Показана возможность построения по этим данным температурно-влажностного критерия, позволяющего определить время и место, где высока вероятность циклогенеза
- 2) Разработан и программно реализован метод обработки информации с искусственных спутников Земли (ИСЗ) для получения распределения значений критерия по выбранной акватории Мирового океана Созданы программные приложения, позволяющие оценить временную и пространственную статистику этого распределения
- 3) Показана эффективность предложенного критерия для выявления районов возможного зарождения ТЦ по сравнению с метеопараметрами, регистрируемыми с ИСЗ
- 4) По спутниковым данным 2002 и 2004 годов получены распределения величины критерия по акватории Северной Атлантики С помощью созданных программных приложений, позволяющих оценить временную и пространственную статистику этих распределений, показано, что усредненные значения полей критерия соответствуют климатологии циклогенеза (многолетней статистике зарождения ТЦ)
- 5) Статистическая обработка данных СВЧ- радиометрии позволила выявить сезонные изменения полей значений критерия Показана хорошая корреляция между сезонным ходом распределения критерия и данными статистики зарождения ураганов в эти же годы
- 6) Для анализа эффективности оценки вероятности возникновения ТЦ проведена статистическая обработка распределения значений критерия по областям, характерным для циклогенеза, и сравнение с реализовавшейся частотой зарождения ТЦ в этих же областях в сезон 2004 года Используя методы корреляционного анализа, найдены коэффициенты регрессии и показано, что коэффициент детерминации близок к 70%
- 7) Проведен посуточный анализ спутниковой информации по выделенной акватории в период активного циклогенеза и предложена модификация критерия, позволяющая учитывать факторы, препятствующие возникновению ТЦ по данным СВЧ-радиометрии

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- 1 Семенчин Е А, Пелевин В Н, Ростовцева В В , Гончаренко И В Обработка на ЭВМ спутниковых данных о метеопараметрах, характеризующих стадию зарождения тропических циклонов // Обзорение прикладной и промышленной математики Том 10 Выпуск 3, 2003, с 743-744
- 2 Семенчин Е А, Гончаренко И В Определение наиболее вероятных областей зарождения тропических циклонов на основе статистических данных. // Успехи современного естествознания, №9, 2003, с 69-70
- 3 Семенчин Е А, Пелевин В Н, Ростовцева В В, Гончаренко И В Прогноз зарождения циклонов по данным спутниковых наблюдений // Успехи современного естествознания, №9, 2004, с 86-88
- 4 Пелевин В Н, Ростовцева В В , Гончаренко И В Оценка возможности возникновения тропического циклона по спутниковым СВЧ-данным с использованием нового температурно-влажностного критерия // Исследование Земли из космоса, 2005, №1, с 86-92
- 5 Pelevin V N, Rostovtseva V V and Goncharenko I V Investigation of latitudinal and seasonal characteristics of tropical cyclone generation processes using Pelevin criterion. // Proceedings of SPIE, vol 6160, part 1, 2005, pp 424-430
- 6 Goncharenko I V and Rostovtseva V V Satellite microwave scanner radiometry data using for analysis of statistics of tropical cyclones generation criterion in the Atlantic Ocean // Proceedings of SPIE 2006 V 65222 652229 8 pages
7. Гончаренко И В и Ростовцева В В Использование данных спутниковой СВЧ-радиометрии для анализа статистики критерия возникновения тропических циклонов в Атлантическом океане – Тезисы XIII Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2-7 июля 2006г), с 35
- 8 Rostovtseva V V and Goncharenko I V Satellite microwave scanner radiometry data using for analyze of the new tropical cyclones generation criterion in the Atlantic Ocean. - European Geosciences Union, General Assembly 2007, Vienna, Austria, April 2007

Отпечатано в ООО «Компания Спутник+»
ПД № 1-00007 от 25 09.2000 г
Подписано в печать 16.05 08
Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1,62
Печать авторефератов (495) 730-47-74, 778-45-60