

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ  
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИ  
НЕУСТОЙЧИВОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗЕМЛИ ПО  
ДАНЫМ РАДИАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗ КОСМОСА**

**В.А. Головки, Т.В. Кондранин**

ЧЕТВЕРТАЯ ОТКРЫТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из  
космоса  
Москва, 13-17 ноября 2006 г.

# Мощные тропические циклоны – яркие представители аномальных природных явлений



Среди наиболее существенных последствий глобального изменения климата особое место занимает возможное изменение активности тропических циклонов (ТЦ).

ТЦ – общее название одних из самых впечатляющих и особо опасных форм геофизических явлений.

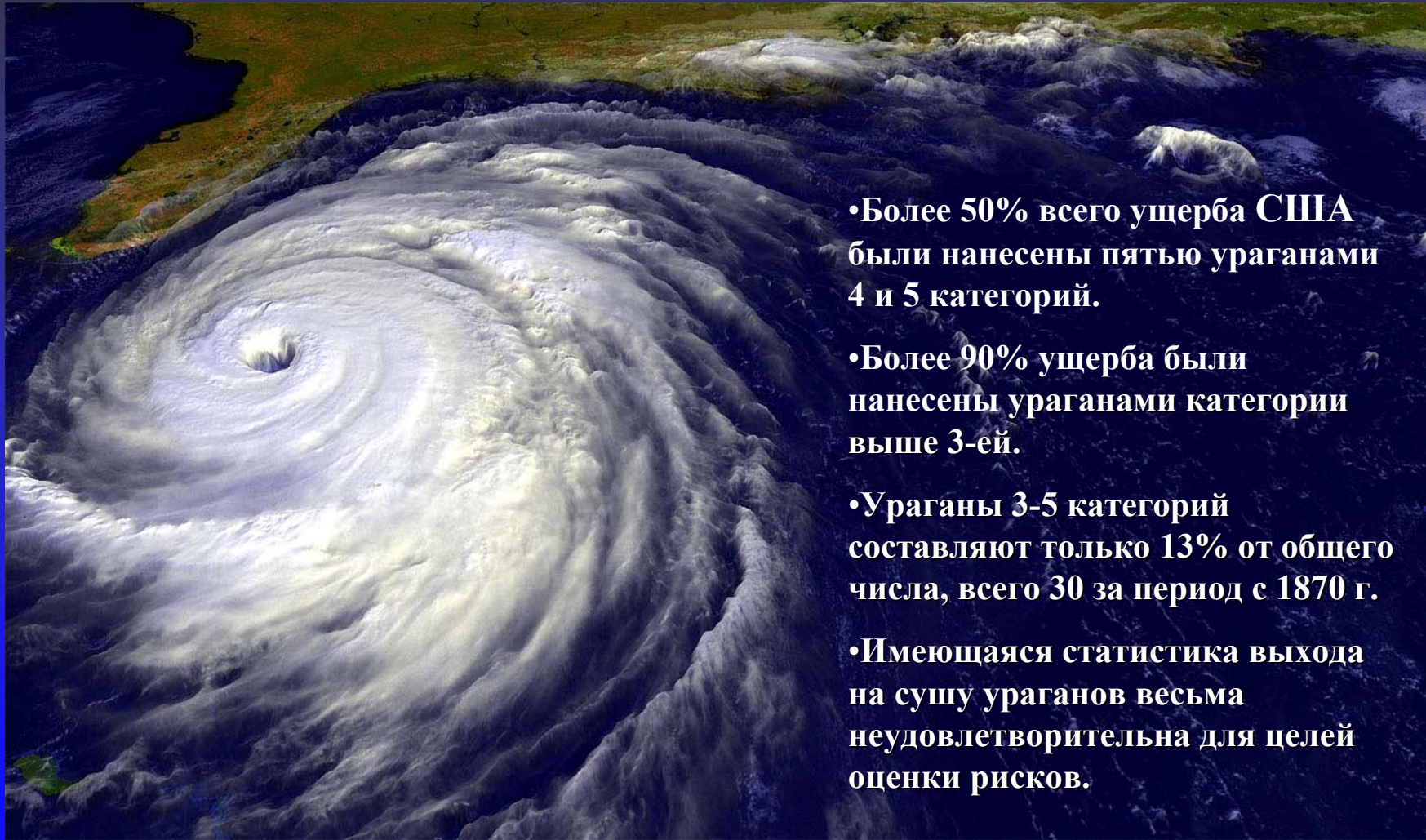
ТЦ, чьи скорости ветра превышают 33 м/с, называют УРАГАНАМИ в северо-западной части Атлантического океана и северо-восточной части Тихого океана. В северо-западной акватории Тихого океана их именуют ТАЙФУНАМИ.



# Основные этапы моделирования

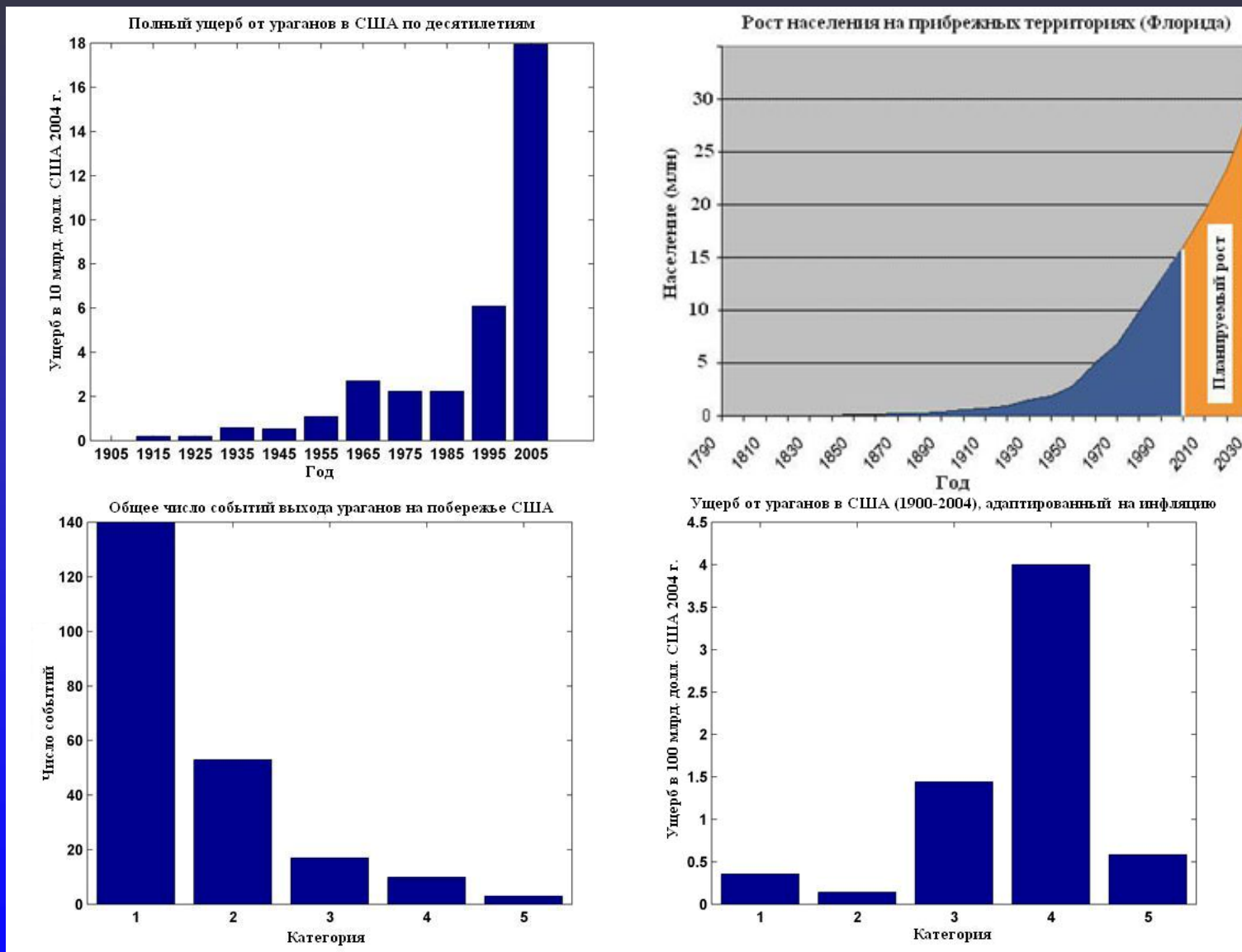
- Сбор и обобщение больших объемов данных дистанционного зондирования, полученных за весь период эпохи космических наблюдений.
- Статистический анализ длинных временных рядов космических и традиционных наблюдений с целью диагностики основных процессов, влияющих на эволюцию аномальных природных явлений в ходе текущих климатических изменений.
- Разработка и совершенствование физических и статистических моделей аномальных природных явлений для нужд прогноза возникновения и развития этих явлений, а также оценки потенциального ущерба от их воздействия на основе данных космического мониторинга.

# Несколько важных фактов



- Более 50% всего ущерба США были нанесены пятью ураганами 4 и 5 категорий.
- Более 90% ущерба были нанесены ураганами категории выше 3-ей.
- Ураганы 3-5 категорий составляют только 13% от общего числа, всего 30 за период с 1870 г.
- Имеющаяся статистика выхода на сушу ураганов весьма неудовлетворительна для целей оценки рисков.

# Статистика ущерба от ураганов в США



# Используемые данные наблюдений

## Данные наблюдений тропических штормов

Данные с 6-часовыми интервалами по всем шести бассейнам тропического циклогенеза с 1945 по 2005 год были получены в Национальной Службе Погоды США (Unisys Weather), база данных JTWC Best Track

## Данные специализированных спутниковых проектов

Данные проекта **TRMM** (Tropical Rainfall Measurement Mission), включающие результаты измерений с помощью микроволнового радиометра TMI (TRMM Microwave Imager) и радара осадков PR (Precipitation Radar)

Данные проекта **ISCCP** (International Satellite Cloud Climatology Project) в рамках Программы Глобального Изучения Климата (WCRP - World Climate Research Program).

Данные **NCEP/NCAR** (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) – данные различных источников, в основном спутниковых.

## Данные комплексных радиационных наблюдений

**NOAA AVHRR** - устанавливается на спутниках серии NOAA, начиная с NOAA-6;

**ERBS WFOV** - широкоугольный несканирующий прибор, установленный на спутнике ERBS;

**ERBS SC** - сканирующий прибор, установленный на спутнике ERBS;

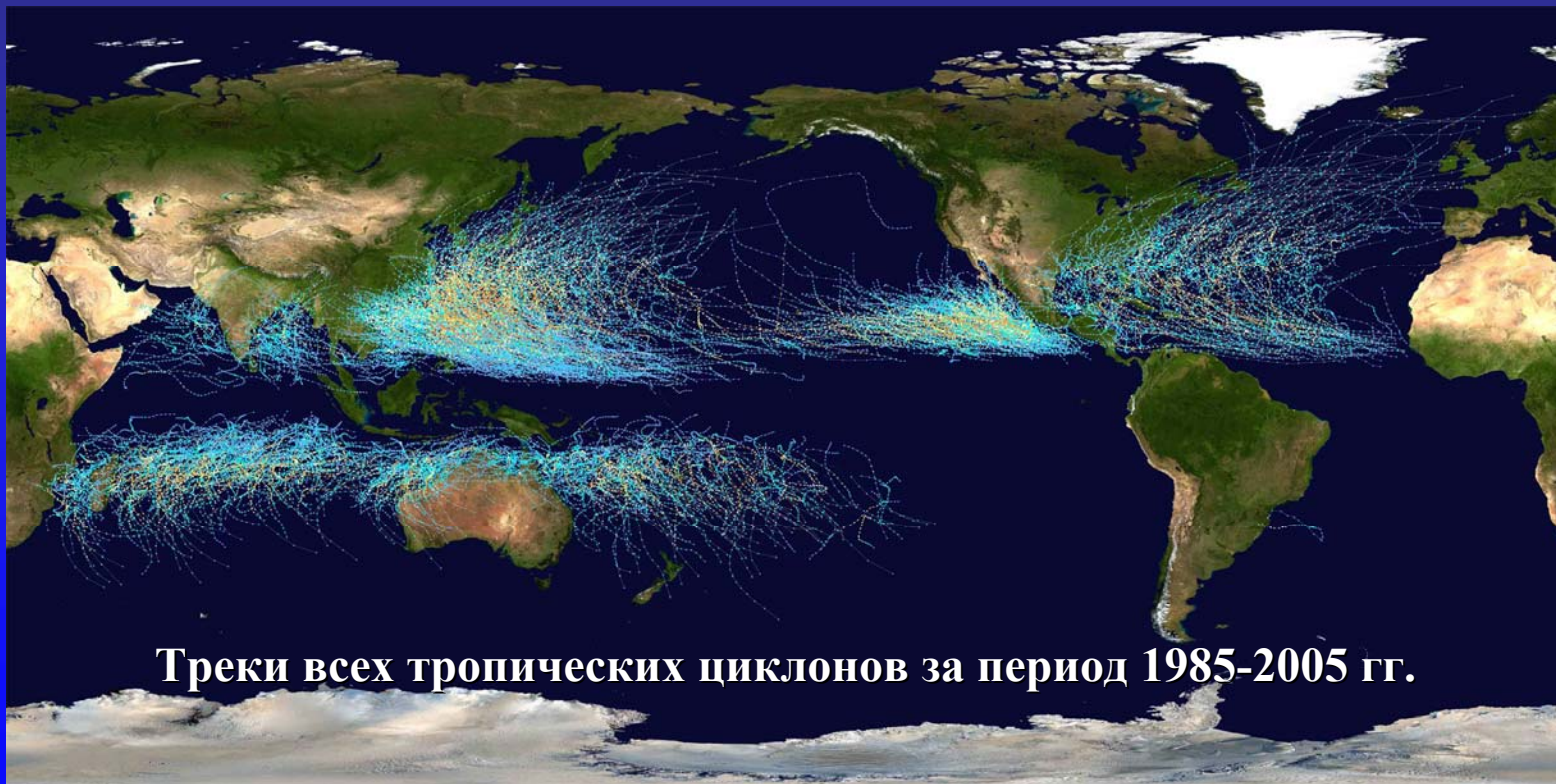
**СРРБ** - Сканирующий Радиометр Радиационного Баланса был установлен на спутниках "Метеор-3М" и "Ресурс-01";

**CERES** - Clouds and the Earth's Radiant Energy System (Система изучения облачности и излучения Земли) был установлен на спутниках TRMM, Terra, Aqua

## Географическое распределение тропических циклонов

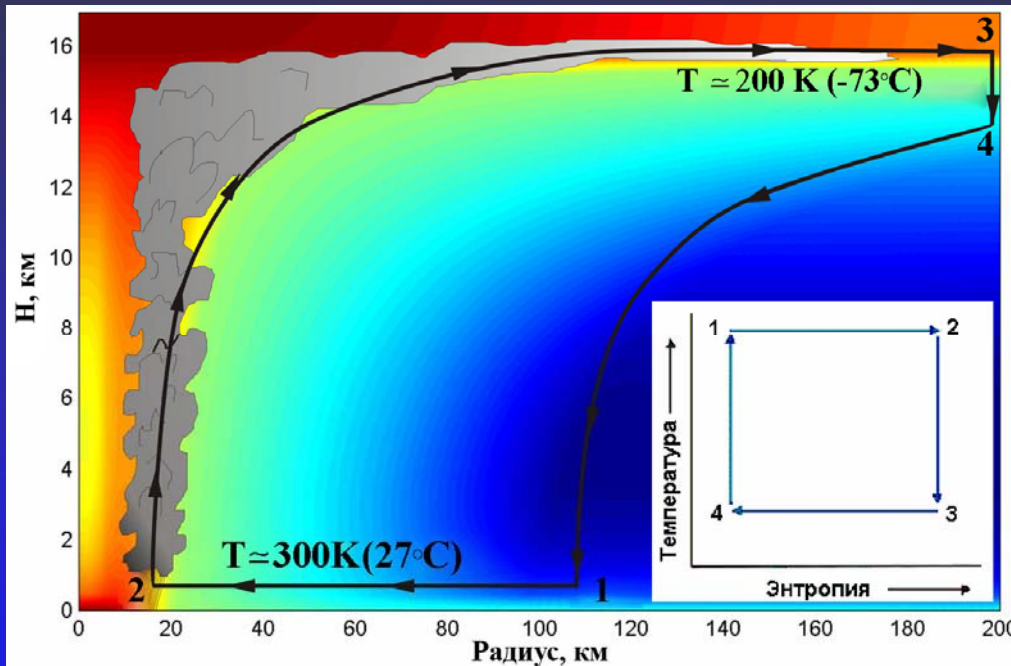
Выделяется шесть явных зон циклонической активности:

- Северо-западная Атлантика
- Северо-восточная акватория Тихого океана
- Северо-западная акватория Тихого океана
- Северная акватория Индийского океана
- Южная акватория Индийского океана
- Южная акватория Тихого океана



**Треки всех тропических циклонов за период 1985-2005 гг.**

# Схематический цикл работы тепловой машины урагана (цикл Карно)



Ураган функционирует как автономная термодинамическая система, в которой имеются два температурных уровня: высокий с поверхностной температурой океана и низкий с температурой верхнего слоя тропосферы. В качестве теплоносителя выступает насыщенный водяным паром воздух. Выделяемая энергия черпается из тепловой энергии океана и потенциальной энергии высотной неустойчивости атмосферы, которая в результате переходит в кинетическую энергию вихря.

1. На участке цикла 1-2 воздух испытывает практически изотермическое расширение, поскольку течет в сторону более низкого давления центра урагана, контактируя с поверхностью океана, являющейся гигантским резервуаром тепла. Интенсивное испарение воды передает энергию от океана воздуху, повышая его энтропию.
2. Воздух, достигнув области сильнейшего приповерхностного ветра, резко поворачивает и течет вверх в пределах стены глаза урагана. Подъем воздуха на участке 2-3 соответствует адиабатическому расширению.
3. Вдали от центра урагана, на участке 3-4 происходит уменьшение энтропии в ходе ИК-излучения в космос при практически постоянной температуре.
4. На участке 4-1 воздух испытывает адиабатическое сжатие, замыкая цикл Карно.



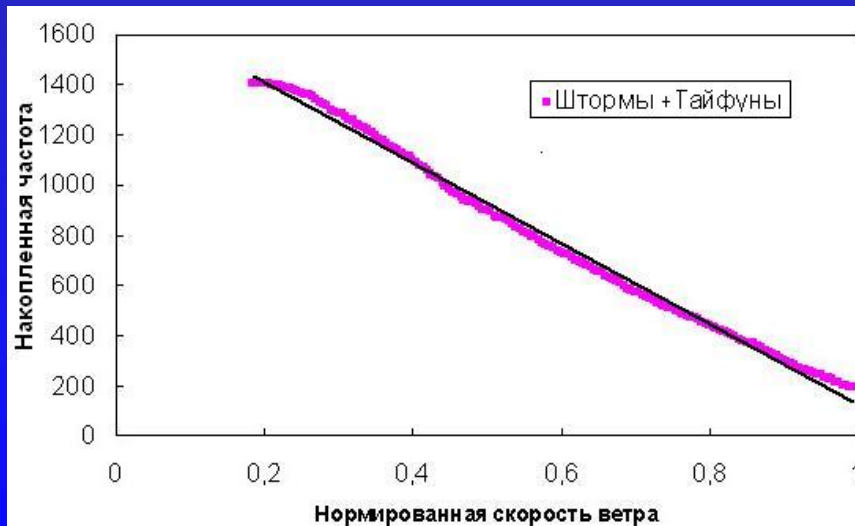
# Интенсивность ураганов

температура поверхности

$$|V_{pot}|^2 \approx \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s - T_o}{T_o} \left( k_0^* - k \right)$$

неравновестность энтальпии океан - атмосфера

температура вытекающего потока  
отношение коэффициентов передачи энтальпии и момента



Общее количество ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана с 1945 по 2004 гг. с нормализованной скоростью ветра, достигающей значения абсциссы.

# Математическое моделирование циклогенеза

## Необходимые условия циклогенеза:

Температура до глубин порядка 50 м должна быть выше 26°C.

Атмосфера должна обладать неустойчивой стратификацией.

Область зарождения циклона должна быть не ближе 500 км от экватора.

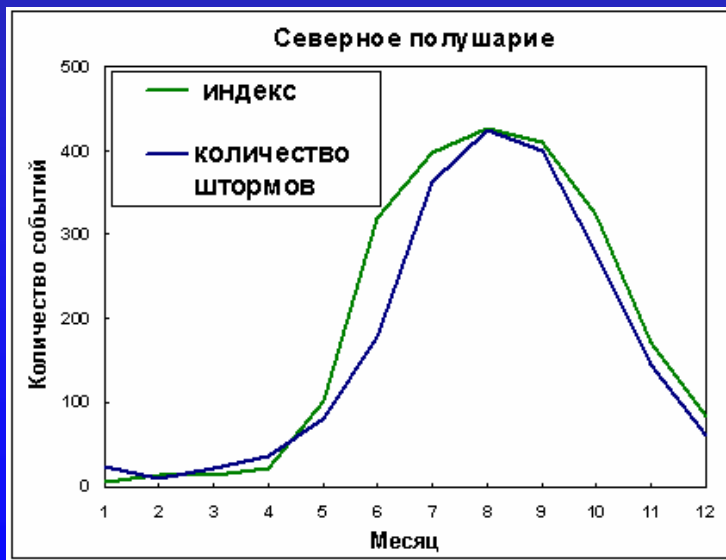
В верхней тропосфере над развивающимся циклоном должна существовать хорошо выраженная расходимость линий тока.

Необходимо зарождение незначительного первоначального вихря, который может играть роль спускового механизма.

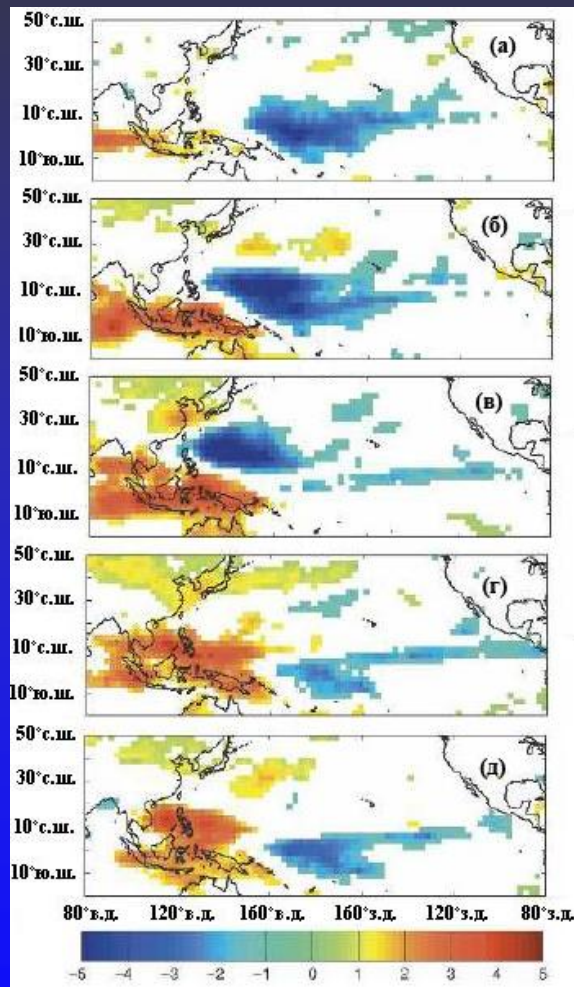
Вертикальный сдвиг ветра между поверхностью и верхней тропосферой не должен превышать 10 м/с.

Emanuel, Nolan (2004)

$$I \sim \frac{\eta^{3/2} H^3 V_{pot}^3}{(1 + 0,1 V_{sh})^2}$$



# Взаимовлияние ураганов и окружающей среды



Лаговая регрессия средненедельных значений УДР (Вт/м<sup>2</sup>) на индекс АСЕ, для 5-ти недель (а) - 2, (б) -1, (в) - 0, (г) +1, и (д) +2, где положительный лаг означает влияние АСЕ на УДР.

Важный результат представляют статистические выводы, полученные с помощью лаговой корреляции энергетических характеристик тайфунов (индекса АСЕ) с различными параметрами окружающей среды.

В качестве переменных рассматривались характеристики турбулентности, УДР, температурной стратификации атмосферы, ТПО, ветра, водяного пара и климатические индексы ЭНЮК.

На рис. приведены результаты (имеющие уровень значимости 95%) лаговой регрессии еженедельных данных УДР на индекс АСЕ в интервале  $\pm$  две недели.

Показательной является дипольная структура положительных и отрицательных значений регрессии.

Обращает на себя внимание тот факт, что максимальная амплитуда отрицательной аномалии УДР достигается за неделю до рассматриваемой активности урагана, «неделя - 1».

Приведенные данные доказывают содержательную информационную основу для использования характеристик УДР в качестве предиктора при прогнозе активности тайфунов, что нашло свое подтверждение при разработке соответствующих статистических моделей

# Физико-математическая модель урагана

Имеющиеся знания формируют общую картину ТЦ как приблизительно осесимметричного вихря.

На раннем этапе исследований модели развития ураганов создавались в основном как феноменологические.

В последнее десятилетие стали развиваться физически обусловленные модели, основанные на известных процессах теплообмена между атмосферой и океаном. Как ни странно, но лучшее согласие с наблюдениями до сих пор дают модели среднего уровня сложности, описывающие поведение вихря не слишком подробно, но и не очень грубо. В настоящее время изошренные модели упускают, видимо, какие-то важные детали, которые в простых представлениях незримо присутствуют на уровне параметризации процессов.

**Основу рассматриваемой физико-математической модели урагана (Emanuel, 1995) составляет учет двух сохраняющихся величин:**

**абсолютного момента импульса относительно оси ТЦ на единицу массы**

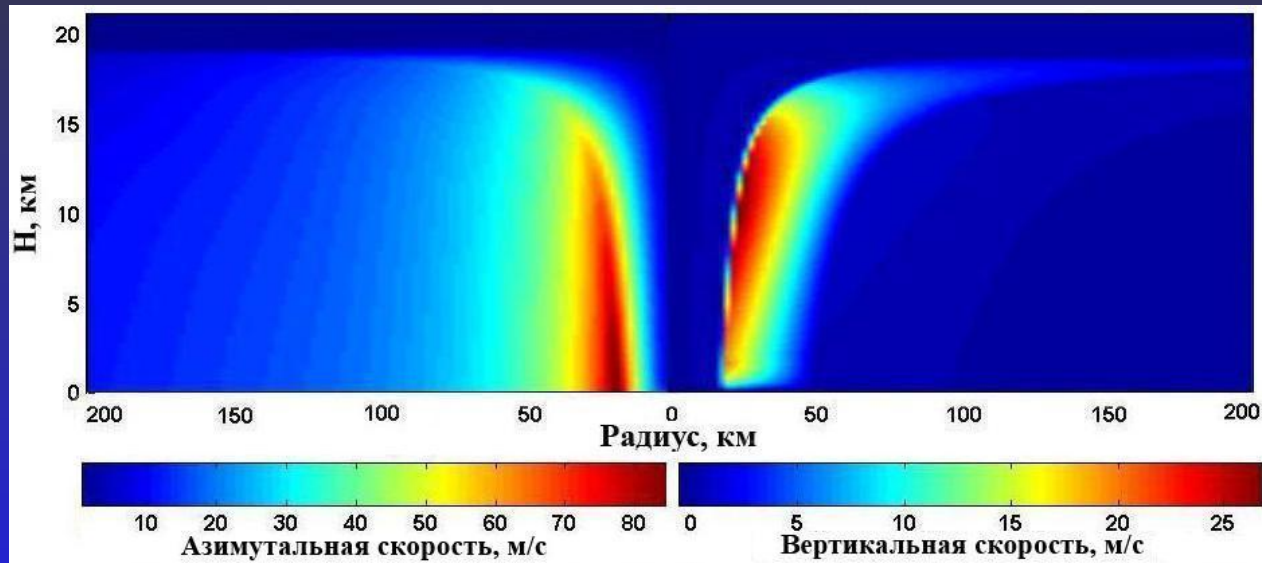
$$M = rV + \frac{1}{2} fr^2$$

**и удельной энтропии**

$$s \approx C_p \ln(T) - R_d \ln(p) + \frac{L_v q}{T} - qR_v \ln(H)$$

# Результаты моделирования урагана Катрина

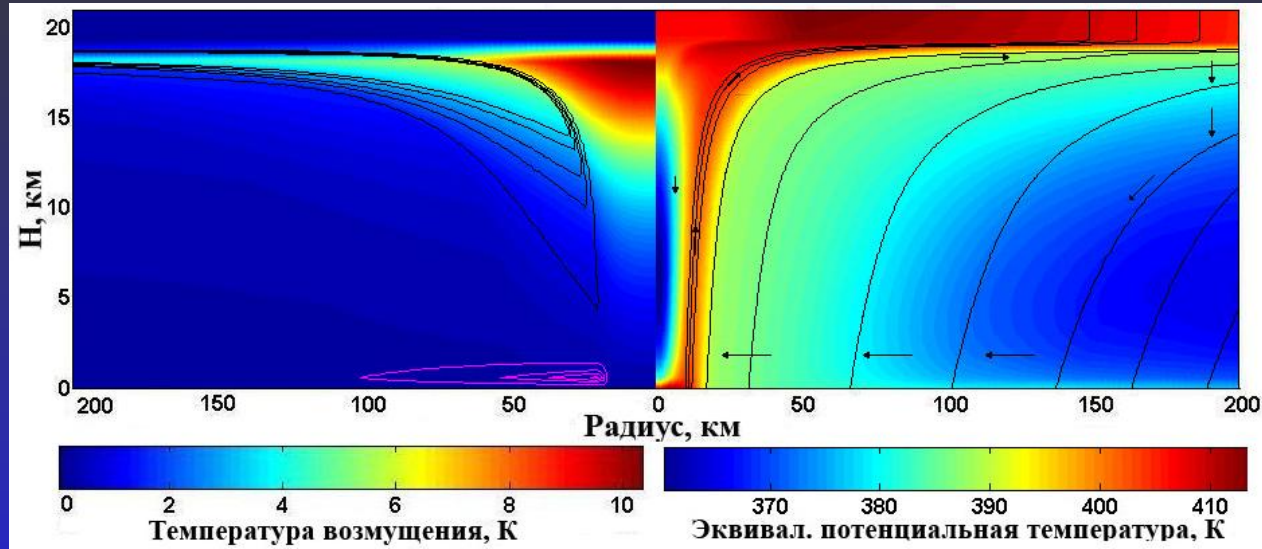
Распределения азимутальной компоненты скорости ветра (слева) и скорости вертикальных потоков (справа) в урагане Катрина на стадии максимального развития.



Для «Катрины» максимальные значения азимутальной компоненты скорости ветра составляли приблизительно 85 м/с. Ветры в большей части объема урагана - циклонические, но вблизи вершины шторма вращение становится антициклоническим за исключением области, близкой к центру шторма. Скорость ветра резко возрастает по мере удаления от центра, достигая максимума на расстоянии 20-30 км от центра. Затем скорость не столь быстро падает в некотором поясе около радиуса максимальной скорости (до 70 км).

Максимальный восходящий поток наблюдается в вихре около глаза шторма, кольцо глубоко конвективной облачности простирающейся от его края на 20-50 км. Максимальная скорость восходящих потоков для «Катрины» составляла около 25 м/с на уровне верхней тропосферы. Глаз урагана Катрина можно идентифицировать в центре по слабо отрицательным значениям вертикальной скорости.

# Результаты моделирования урагана Катрина

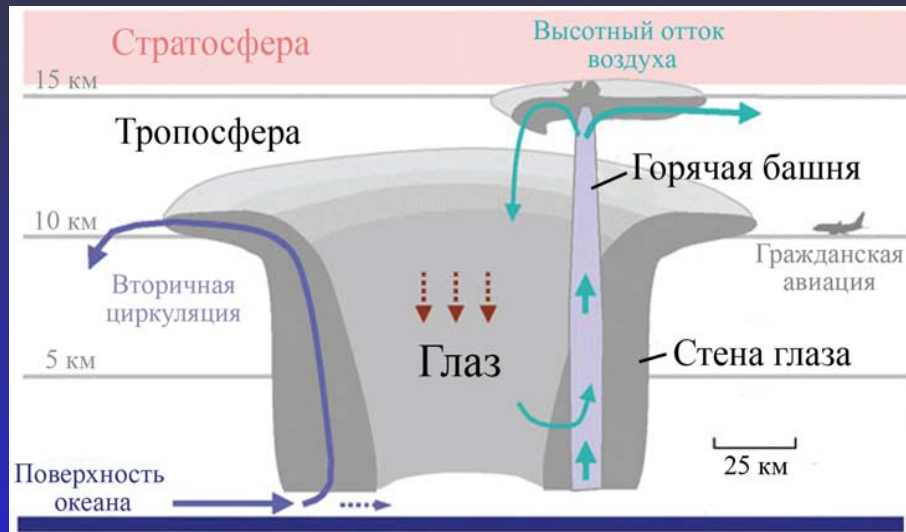


Значения температуры возмущения, представляющей разность между температурой в точке урагана и температурой внециклонического воздуха на той же высоте. Обращает внимание наличие горячего ядра шторма на больших высотах. В данном случае температура внутри шторма была на  $10-11^{\circ}\text{C}$  выше, чем за его пределами. Контурами изображаются радиальные компоненты движения: фиолетовые контуры на низких уровнях изображают входящий поток, достигающий скорости около  $20\text{ м/с}$ , а черным цветом на высоких уровнях показан исходящий поток, который достигает скорости  $80-90\text{ м/с}$ . Но, при этом заметим, что над исходящим потоком существует слой слабого входящего потока, опускающегося на внешний край глаза.

Распределения сохраняющихся величин  $M$  и  $s$  показаны на правой панели рисунка. Псевдоцвет отображает меру удельной энтропии, представленной значениями эквивалентной потенциальной температуры. Энтропия увеличивается к центру, достигая максимума в стене глаза. В центральной части ТЦ наблюдаются наивысшие значения энтропии на уровне морской поверхности. Черные контуры на рисунке отображают распределение абсолютного момента импульса на единицу массы относительно оси шторма.  $M$  уменьшается по направлению вверх и внутрь и имеет очень сильный градиент в стене глаза. Стрелки указывают направления перемещения воздушных масс в этой плоскости.

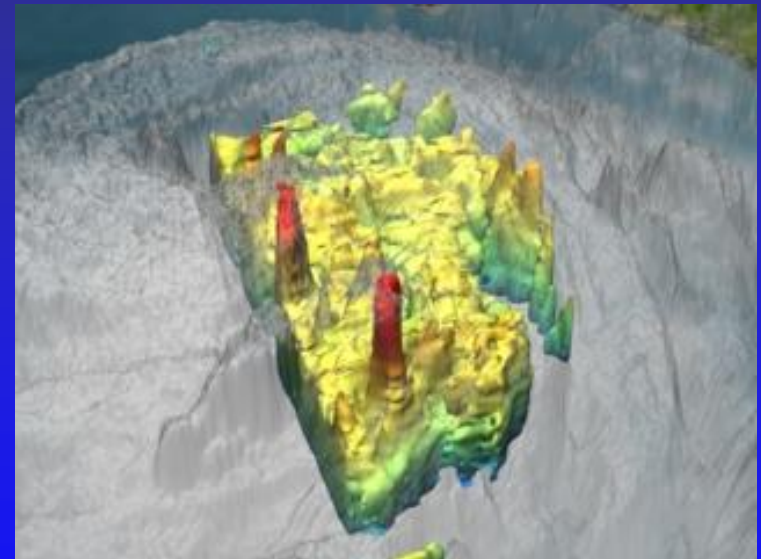


# Интенсификация ураганов



Радар осадков PR работает на частоте 13.8 ГГц и обеспечивает получение уникальных трехмерных данных с пространственным горизонтальным разрешением 4.3 км (в надир) и вертикальным разрешением около 250 м в полосе обзора 220 км.

При анализе аномальных явлений в тропической зоне использовались данные временных рядов TRMM о 3-х мерном распределении осадков и скрытой теплоте парообразования. В основу формирования таких рядов были положены результаты измерений с помощью микроволнового радиометра TMI (TRMM Microwave Imager) и радара осадков PR (Precipitation Radar)

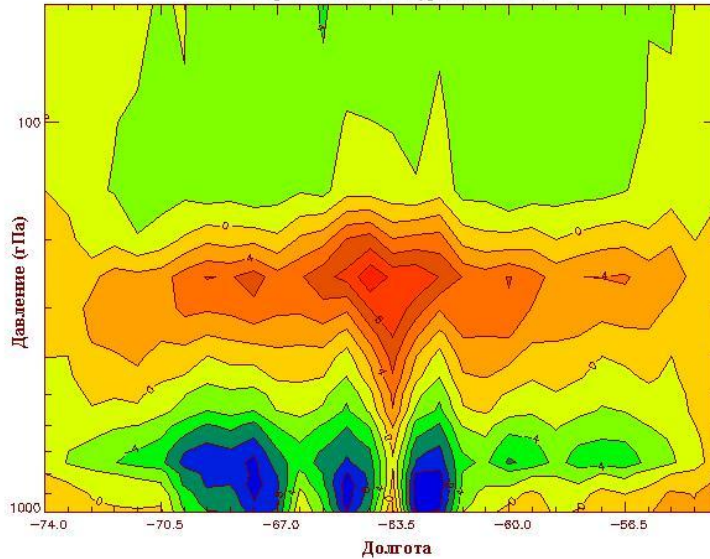


Экзотермические глубоко конвективные облака (до 16 км) в стене глаза урагана Катрина 28 августа 2005 г., когда интенсивность достигла 5-ой категории

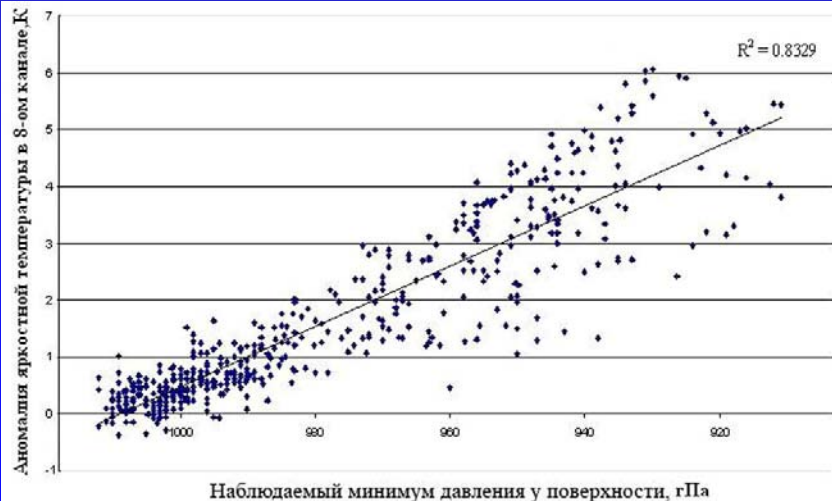
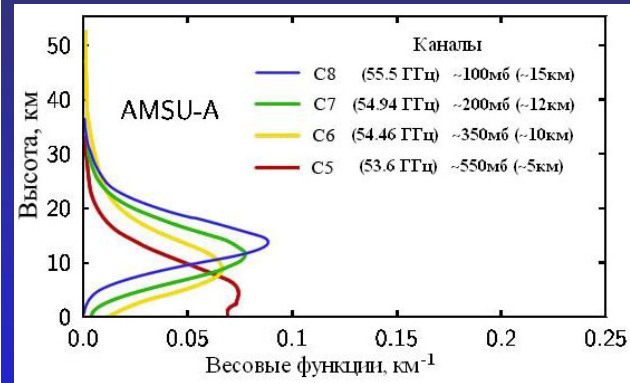


# Интенсификация ураганов

Температурные аномалии  
в поперечном сечении урагана Флойд



Когда ТЦ развиваются до ураганов, для них становится характерным сопутствующее нагревание верхней тропосферы в результате адиабатического сжатия воздуха, когда он опускается внутри центра шторма.



Существует сильная корреляция между аномалией яркостной температуры, измеренной прибором AMSU-A, и интенсивностью ТЦ.

Алгоритм CIMSS AMSU использует эту взаимосвязь для оценки минимального давления тропического циклона у поверхности.

Сравнение нового (CIMSS AMSU) и традиционного (Dvorak) методов (ско):

Для Атлантики - 6.4 гПа против 9.0 гПа;

Для северо-западной акватории Тихого океана - 4.7 гПа против 11.1 гПа

# Пространственное распределение среднегодовых характеристик тайфунов за период 1945-2004 гг. в ячейках $2,5^\circ \times 2,5^\circ$

Среднегодовое количество тайфунов в северо-западной акватории Тихого океана



Индекс аккумулятивной энергии циклона

$$ACE = \sum_0^\tau V_{\max}^2$$

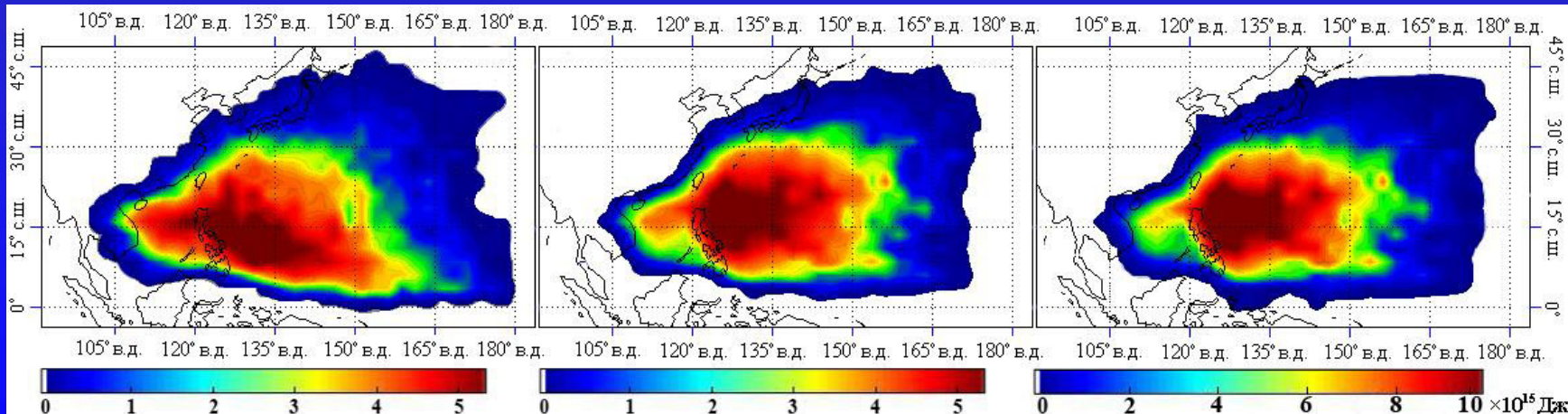


$$P_D = 2\pi \int_0^\tau \int_0^{r_0} C_D \rho |V|^3 r dr dt$$

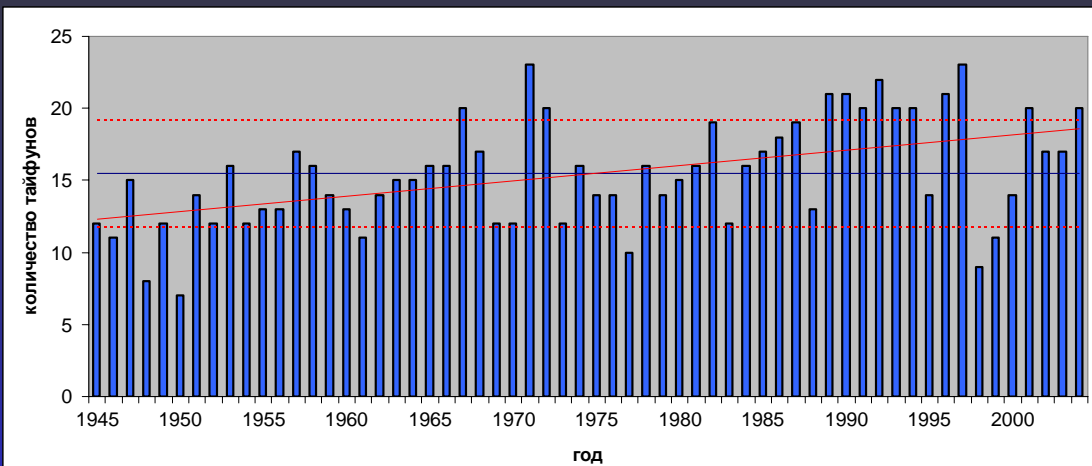
Индекс рассеяния энергии

$$PDI = \int_0^\tau V_{\max}^3 dt$$

при  $C_D = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$  и  $r_0 = 30 \text{ км}$

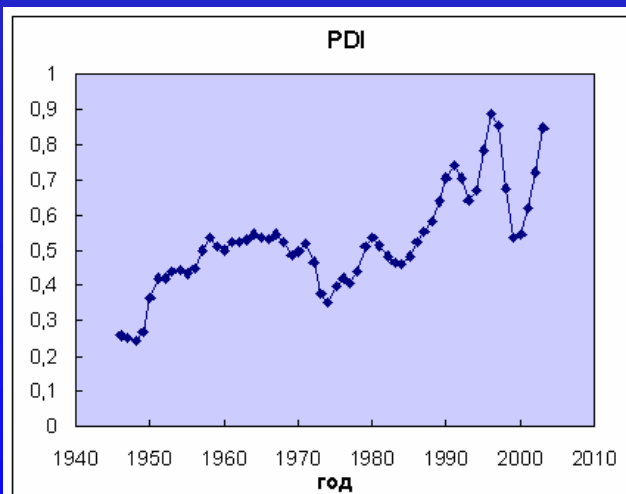


# Междекадные изменения активности тайфунов



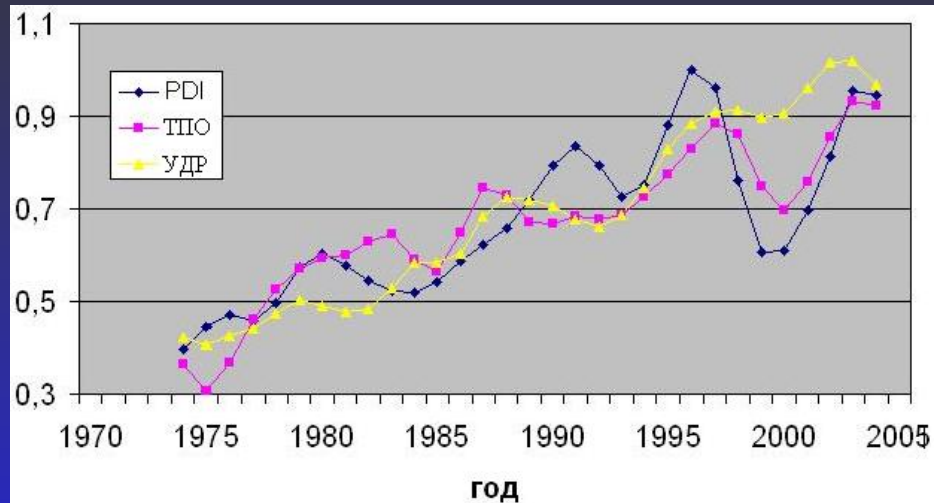
Слабо  
положительный  
тренд увеличения  
количества тайфунов  
не является  
статистически  
значимым

Значительное увеличение рассеиваемой энергии (более чем на 75%)  
за последние 30 лет



среднее время  
жизни  
тайфунов  
увеличилось  
более чем на 3  
суток

# Глобальное потепление и ураганы

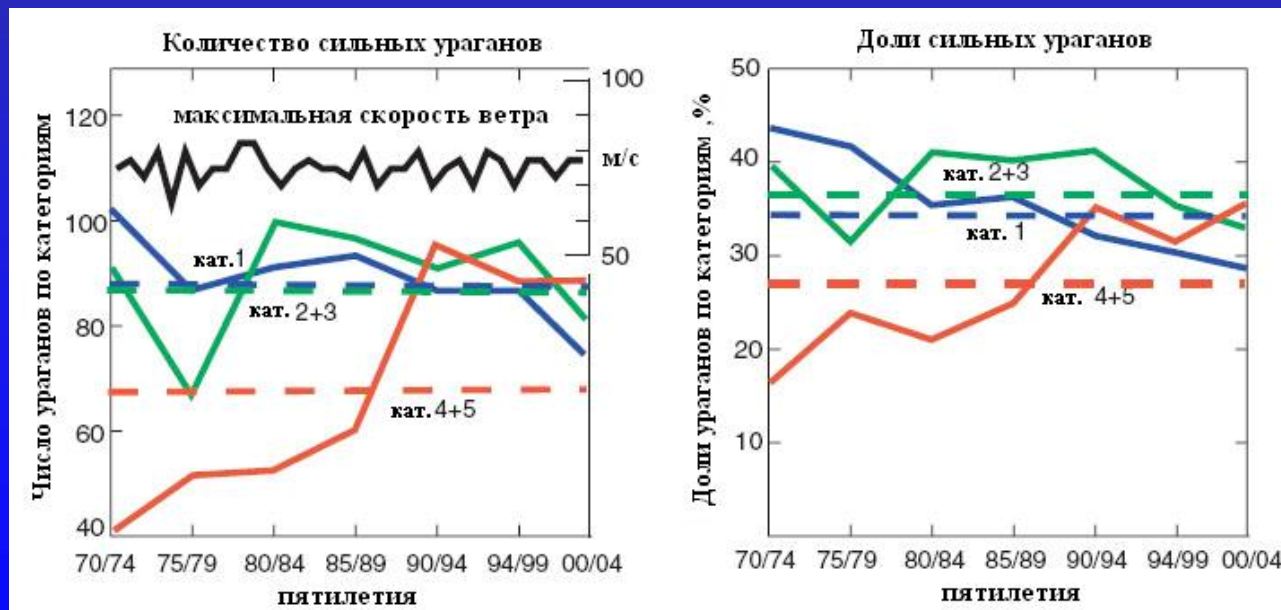


Между PDI и ТПО наблюдается очень высокая корреляция,  $r=0.84$ .

Более адекватной характеристикой термодинамической среды является УДР.

Корреляция PDI с УДР тоже очень высокая,  $r=0.80$ .

Результат подтверждает вывод об оптимальности использования характеристик УДР



A decorative graphic on the left side of the slide. It features a vertical orange arrow pointing upwards, a grey arrow pointing to the left, and a red arrow pointing to the right. The background of the slide is a gradient from blue at the top to dark blue at the bottom.

## Заключение

- На основе теоретических предпосылок и результатов имеющихся наблюдений проанализированы факторы, влияющие на интенсивность, частоту и географическое распределение ураганов.
- Осуществлена компьютерная реализация математической модели урагана как физического явления с использованием всего набора необходимых физических параметров, определяющих текущее энергетическое состояние. Показано, что модель средней сложности дает правильный ход развития уже возникшего ТЦ, эволюцию его энергетических характеристик и разрушительной силы.
- Получены важные результаты, подтверждающие интенсификацию активности ураганов вследствие глобального потепления. Этот тренд связан как с более продолжительным временем жизни ураганов, так и большей их интенсивностью. Предварительные результаты свидетельствуют о том, что грядущее потепление может привести к дальнейшему росту потенциальной разрушительной способности ТЦ и существенному увеличению ущерба, наносимому ураганами.