

# Математическое моделирование аномальных природных явлений в динамически неустойчивой климатической системе Земли по данным радиационных наблюдений из космоса

В.А. Головко<sup>1</sup>, Т.В. Кондранин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГУ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

E-mail: [golovko@planet.iitp.ru](mailto:golovko@planet.iitp.ru)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

E-mail: [kondr@kondr.rector.mipt.ru](mailto:kondr@kondr.rector.mipt.ru)

На основе теоретических предпосылок и результатов космических наблюдений проанализированы факторы, влияющие на интенсивность, частоту и географическое распределение аномальных природных явлений, проявляющихся в виде мощных тропических циклонов (ураганов, тайфунов). Обсуждается реализованная компьютерная математическая модель урагана, как физического явления с использованием набора геофизических параметров, определяющих текущее энергетическое состояние. Рассматриваются вопросы настройки (идентификация) параметров модели по эмпирическим данным. С использованием модели проведено численное моделирование сильнейших ураганов 2005 г. на акватории Атлантического океана («Катрина», «Рита», «Вилма»). В рамках выполненного исследования получены также результаты, подтверждающие интенсификацию активности ураганов вследствие глобального потепления.

## Введение

Среди наиболее существенных последствий глобального изменения климата особое место занимает возможное изменение активности тропических циклонов [1]. Тропические циклоны – это общее название одних из самых впечатляющих и особо опасных форм геофизических явлений. Тропические циклоны (ТЦ), чьи скорости ветра превышают 33 м/с в северо-западной части Атлантического океана и северо-восточной части Тихого океана называют ураганами. В северо-западной акватории Тихого океана их именуют тайфунами.

Наибольший интерес с научной и практической точек зрения представляют три аспекта активности ураганов: их частота, интенсивность, и географическое распределение. Любое изменение в частоте, с какой ураганы атакуют населенные территории, имеет большое значение. Но следует заметить, величина наносимого при этом ущерба растет примерно как куб максимальной скорости ветра в ураганах, так что практически наибольшую опасность несут именно интенсивные ураганы. И если некоторый аспект изменения климата может привести к меньшему количеству ураганов, но большей интенсивности, мы вправе ожидать и больших потерь. Также чрезвычайно важным является выяснение причин, по которым изменение климата может приводить к перераспределению ураганов: они могут возникать реже в тех частях мира, где раньше господствовали и наоборот все чаще появляться там, где они раньше были редкостью. С научной точки зрения, перечисленные аспекты в существенной степени различны. Факторы, которые управляют интенсивностью ураганов, очевидно, весьма отличаются от тех, которые управляют частотой их возникновения, и это имеет свое отражение в рядах наблюдений.

В данной статье особое внимание уделено рассмотрению тех факторов, которые влияют на интенсивность, частоту и географическое распределение ураганов. Длительные космические наблюдения дают уникальную возможность представить эмпирическое доказательство того, что активность ураганов за последние тридцать лет значительно возросла. Методы современного математического моделирования позволяют обобщить накопленный эмпирический материал с целью не только адекватной диагностики происходящих климатических изменений, но и получения состоятельного прогноза возможных последствий.

## Основные этапы моделирования

Процесс моделирования активности ураганов осуществлялся посредством реализации трех основных этапов подготовки и анализа имеющихся эмпирических данных:

- 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.

В ходе реализации первого подготовительного этапа были использованы следующие данные наблюдений:

### Данные о тропических циклонах

Данные с 6-часовыми интервалами по всем шести бассейнам тропического циклогенеза с 1945 по 2005 год, полученные в Национальной Службой 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 (в основном из спутниковых источников) об основных геофизических параметрах окружающей среды.

### Данные комплексных радиационных наблюдений

ERBS WFOV - широкоугольного несканирующего прибора, установленного на спутнике ERBS;

ERBS SC - сканирующего прибора, установленного на спутнике ERBS;

СРРБ - Сканирующего Радиометра Радиационного Баланса, установленного на спутниках “Метеор-3М” и “Ресурс-01”;

CERES - Clouds and the Earth's Radiant Energy System (Системы изучения облачности и излучения Земли), установленной на спутниках TRMM, Terra, Aqua.

## Частота, интенсивность и статистика материального ущерба ураганов

ТЦ всегда развиваются из уже существующих атмосферных возмущений с характерными масштабами 1000-3000 км. На рис.1 изображены треки ТЦ за десятилетний период (1995-2004 гг.), скорость ветра в которых превышала 17 м/с.

Рис. 1

На рис.1 выделяются шесть явных зон тропической 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.

Интенсивность каждого отдельного урагана традиционно измеряется его максимальной приповерхностной скоростью ветра. Известно, что материальные потери от ураганов растут про-

порционально кубу скорости ветра в ТЦ [2], также как и полная рассеянная мощность  $P_D$ , которая задается выражением [3]:

$$P_D = 2\pi \int_0^{\tau} \int_0^{r_0} C_D \rho |V|^3 r dr dt, \quad (1)$$

где  $\rho$  - приповерхностная плотность воздуха,  $|V|$  - величина скорости приповерхностного ветра, а интегрирование производится по радиусу ТЦ до его внешней границы, задаваемой величиной  $r_0$ , и по времени его жизни  $\tau$ .  $P_D$  имеет размерность энергии и представляет собой полную энергию, рассеянную ТЦ за время его жизни. Так как значение интеграла в уравнении (1) в большей степени определяется высокими скоростями, произведение  $C_D \rho$  можно заменить константой и ввести определение упрощенного индекса рассеяния энергии  $PDI$  [3]:

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{\max}^3 dt, \quad (2)$$

где  $V_{\max}$  - максимально достигнутая скорость ветра на высоте 10 м. Заметим, что хотя этот индекс и не является идеальной мерой рассеянной энергии, он все же лучший индикатор потенциальной угрозы ТЦ, чем частота появления или интенсивность сами по себе. Введение этого индекса является логическим продолжением попыток более точной оценки кинетической энергии реализуемой ТЦ. В этом смысле он улучшает точность оценки ранее введенного индекса «аккумулированной энергии циклона» (Accumulated Cyclone Energy - ACE) [4]. Индекс ACE определяется как сумма квадратов максимально достигнутых скоростей в течение существования ТЦ.

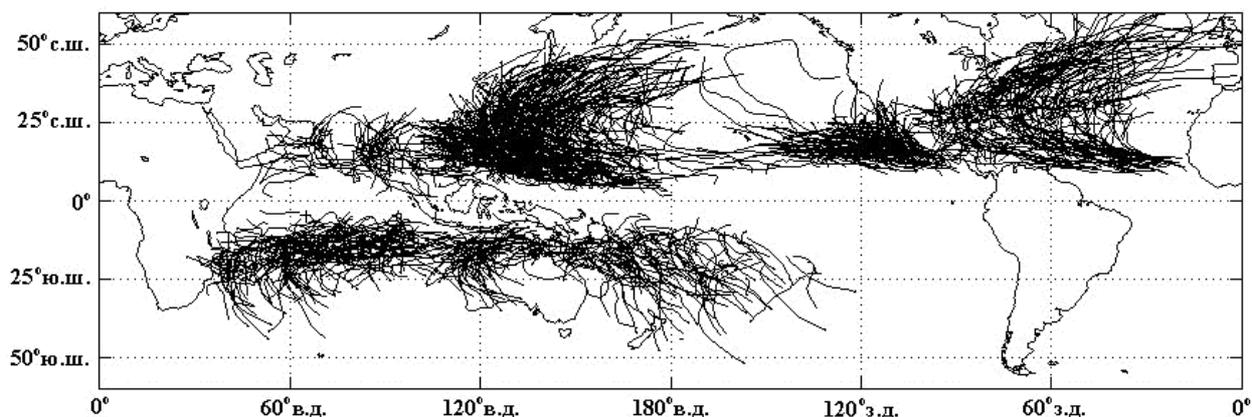


Рис. 1. Треки тропических циклонов, скорость ветра в которых превышала 17 м/с за период 1995-2004 гг.

Рассмотрим более подробно особенности циклогенеза в северо-западной акватории Тихого океана [1]. Это имеет особенное значение для России, поскольку именно дальневосточное побережье РФ подвержено воздействию самых северных треков ураганов (тайфунов) в этом бассейне. На рис. 2 приведены ежегодные количества тайфунов за 60 лет (с 1945 по 2004 гг.).

Из данных, приведенных на рисунке, видно, что в среднем ежегодно бывает около 15 тайфунов. Естественная их изменчивость в этой акватории не велика и составляет порядка 3-х тайфунов. Существует слабый положительный тренд изменения количества тайфунов – порядка 1-2 в десятилетие, но этот тренд в настоящее время не является статистически значимым. Это означает, что остающимися источниками изменения активности ТЦ является увеличение их интенсивности и средней продолжительности существования. Проводимые в последнее время исследования подтверждают это предположение [3].

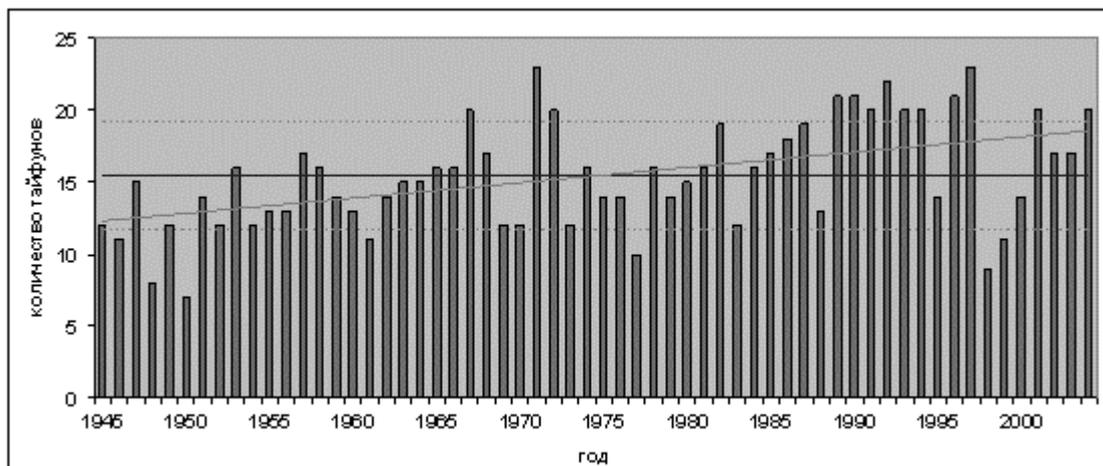


Рис. 2. Ежегодное количество ТЦ (тайфунов, скорость ветра в которых превышала 33 м/с) в северо-западной акватории Тихого океана с 1945 по 2004 гг.

Для выявления долгосрочных трендов и междекадного изменения активности ураганов была использована интегральная за год оценка индекса  $PDI$  для северо-западной акватории Тихого океана. С целью минимизации влияние межгодовой изменчивости к временному ряду  $PDI$  (также как и к другим анализируемым рядам) был применен сглаживающий фильтр 1-2-1. На рис. 3 (вверху) приведены нормированный временной ряд индекса  $PDI$  и среднее время жизни тайфунов за период 1945-2004 гг. (вверху). На том же рисунке (внизу) представлены нормированные временные ряды наблюдений уходящей длинноволновой радиации (УДР), температуры поверхности океана (ТПО) и индекса  $PDI$  за последние более чем тридцать лет (1974-2004 гг.).

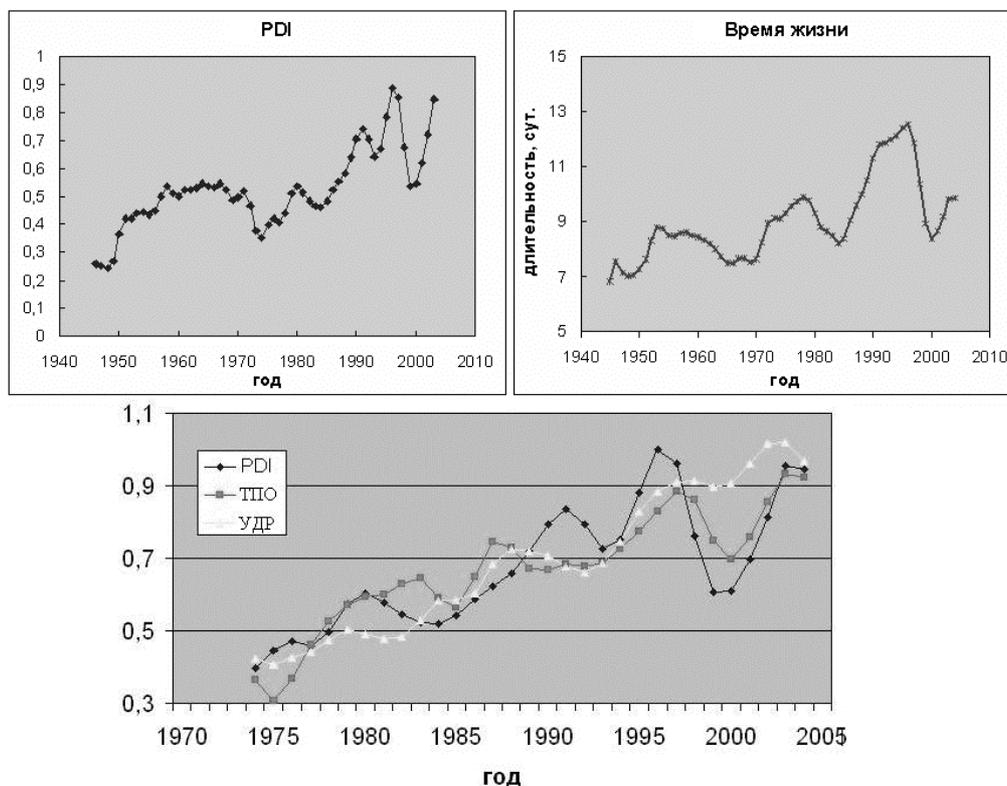


Рис. 3. Нормированный временной ряд индекса  $PDI$  и среднее время жизни тайфунов за период 1945-2004 гг. (вверху) и нормированные временные ряды наблюдений УДР, ТПО и  $PDI$  за период 1974-2004 гг. (внизу)

Из данных, приведенных на рисунке, видно, что *PDI* за это время увеличился почти в два раза. Значительное увеличение рассеиваемой энергии (более чем на 75%) за последние 30 лет происходило из-за того, что в среднем ТЦ стали не только более интенсивными, но и стали дольше сохранять свою большую интенсивность. За период с 1945 по 2004 гг. среднее время жизни тайфунов увеличилось более чем на 3 суток (на 83 часа). При этом максимальная скорость ветра только за последние 30 лет увеличилась более, чем на 15%. Таким образом, и длительность, и максимальная скорость ветра вносят свой вклад в общее увеличение рассеиваемой энергии. Для фиксированной скорости интенсификации и диссипации, шторму требуется больше времени, чтобы достигнуть большей максимальной скорости, а также больше времени для диссипации. Поэтому неудивительно, что более сильные штормы живут дольше.

Между *PDI* и ТПО наблюдается очень высокая корреляция,  $r=0.84$ . При этом некоторые междекадные изменения, по-видимому, связаны с ЭНЮК. Заметно, что теоретически, максимальная скорость ТЦ должна возрасти на 5% для каждого  $1^{\circ}\text{C}$  увеличения ТПО в тропиках. С учетом того, что наблюдаемое увеличение составило всего  $0.5^{\circ}\text{C}$ , то максимальная скорость должна была вырасти только на 2-3%, а рассеиваемая энергия на 6-9%. Если добавить ожидаемое увеличение жизни штормов, нужно было ожидать общее увеличение *PDI* на 8-12%, что намного меньше наблюдаемых изменений. Это объясняется тем, что ТЦ не напрямую реагируют на ТПО, а подходящей мерой их термодинамической среды является потенциальная интенсивность, которая зависит (как отмечалось выше) не только от ТПО, а от всего температурно-влажностного профиля атмосферы. В этой связи более адекватной характеристикой термодинамической среды является УДР. Корреляция *PDI* с УДР тоже очень высокая,  $r=0.80$ . Этот результат еще раз подтверждает вывод об оптимальности использования характеристик УДР в качестве предиктора при моделировании активности ураганов.

Данная ситуация характерна не только для северо-западной акватории Тихого океана. Она приблизительно сохраняется для всех шести явных зон тропической циклонической активности. Анализ глобальных статистических данных об ураганах показывает, что хотя максимально достигаемые скорости ветра в сильнейших ТЦ, слабо варьируя, держались последние тридцать лет на уровне около 80 м/с, происходило заметное перераспределение долей слабых и сильных ураганов. Данные, приведенные на верхней левой панели рис. 4, иллюстрируют этот факт.

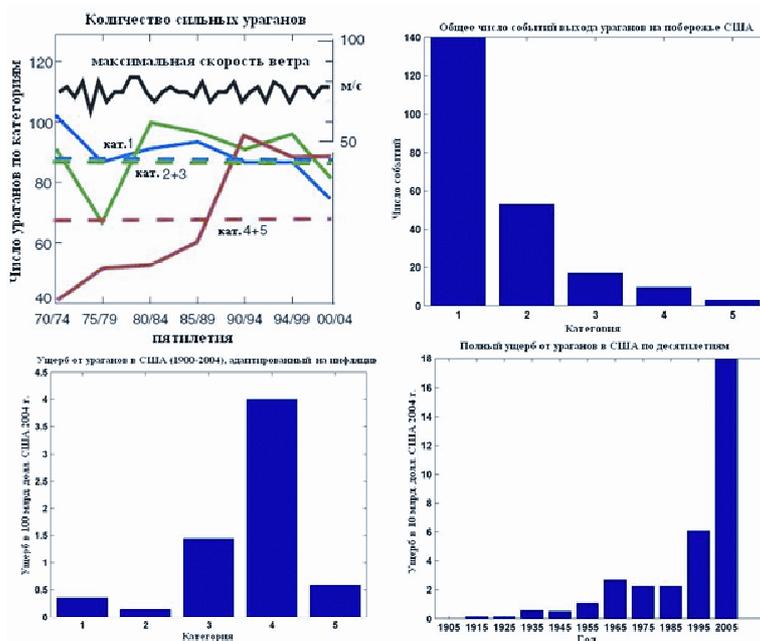


Рис. 4. Эволюция глобальной интенсивности ураганов (вверху слева) и статистика ущерба от ураганов в США (остальные панели)

Видно, что в течение этого периода доля слабых ураганов (1 кат.) немного уменьшилась, доли ураганов средней силы (2,3 кат.) практически не изменились, в то время как доли сильных ураганов (4,5 кат.) возросли. Это косвенно подтверждает вывод о существенном росте рассеиваемой энергии ураганов (более чем на 3/4) за последние 30 лет. Как уже отмечалось выше, наибольшую опасность несут именно интенсивные ураганы. Наиболее достоверные оценки материального ущерба от ураганов дают страховые компании США. По их данным более 50% всего ущерба США были нанесены пятью ураганами 4 и 5 категорий (чья скорость ветра значительно превышала 60 м/с). При этом более 90% ущерба были нанесены ураганами категории выше 3-ей. Однако следует заметить, что ураганы 3-5 категорий составляют только 13% от общего числа, и всего их на побережье США было зафиксировано около 30 за период с 1870 г. Данные рис. 4 наглядно демонстрируют статистику ущерба от ураганов. Правда при критическом анализе этих оценок следуют заметить, что столь феноменальный рост ущерба в последние годы связан не только с усилением активности ураганов, но и со значительным ростом народонаселения и числа строений на прибрежных субтропических территориях США. Особую опасность для населения представляет неожиданная интенсификация ураганов непосредственно перед их выходом на сушу. Решению проблемы раннего оповещения об интенсификации ТЦ может способствовать использование компьютерных математических моделей урагана, как физического явления с использованием всего доступного набора геофизических параметров, определяющих текущее энергетическое состояние.

### Математическое моделирование активности ураганов

Основу построения физико-математической модели урагана составляет учет двух сохраняющихся величин: абсолютного момента импульса относительно оси ТЦ на единицу массы  $M$  и удельной энтропии [5]. Величина  $M$  определяется как

$$M = rV + \frac{1}{2} fr^2, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус от центра шторма,  $V$  – тангенциальная скорость и  $f$  – параметр Кориолиса, который равен удвоенной проекции угловой скорости Земли на локальную вертикальную плоскость. Вторая составляющая правой части уравнения (3) является вкладом вращения Земли в момент импульса, тогда как первая – вклад поля вращающихся ветров. В отсутствие момента трения,  $M$  – сохраняется в соответствии с моделью осесимметричного смещения жидкостных колец.

Второй сохраняющейся величиной является удельная энтропия  $s$ . Энтропия – функция температуры, давления и концентрации воды. Приближенную оценку  $s$  можно определить следующим образом:

$$s \approx C_p \ln(T) - R_d \ln(p) + \frac{L_v q}{T} - qR_v \ln(H), \quad (4)$$

где  $T$  – абсолютная температура,  $p$  – давление,  $q$  – концентрация водяного пара и  $H$  – относительная влажность. Термодинамическими параметрами в уравнении (4) являются теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$ , газовые постоянные для сухого воздуха  $R_d$  и водяного пара  $R_v$ , а также скрытая теплота парообразования  $L_v$ . Величина  $s$  сохраняется благодаря обратному адиабатическому смещению воздушных масс, даже при смене фазы воды.

С использованием этой модели было проведено численное моделирование сильнейших ураганов 2005 г. на акватории Атлантического океана («Катрина», «Рита», «Вилма»). Получено удовлетворительное соответствие рассчитанных и наблюдаемых значений приповерхностной скорости ветра. Данные, представленные на рис. 5, иллюстрируют точность моделирования.

Рассмотрим более подробно результаты компьютерной реализации математической модели урагана как физического явления с использованием всего набора необходимых физических пара-

метров, определяющих текущее энергетическое состояние на примере печально известного урагана Катрина. Ураган просуществовал более 8-ми суток, с 5 часов утра 23 августа до полудня 31 августа 2005 г. Максимальная устойчивая скорость ветра составляла 77 м/с с кратковременными усилениями до 85 м/с. Минимальное давление в центре составляло около 900 гПа с пиковыми значениями 890 гПа. На рис. 6 представлены характеристики эволюции урагана Катрина.

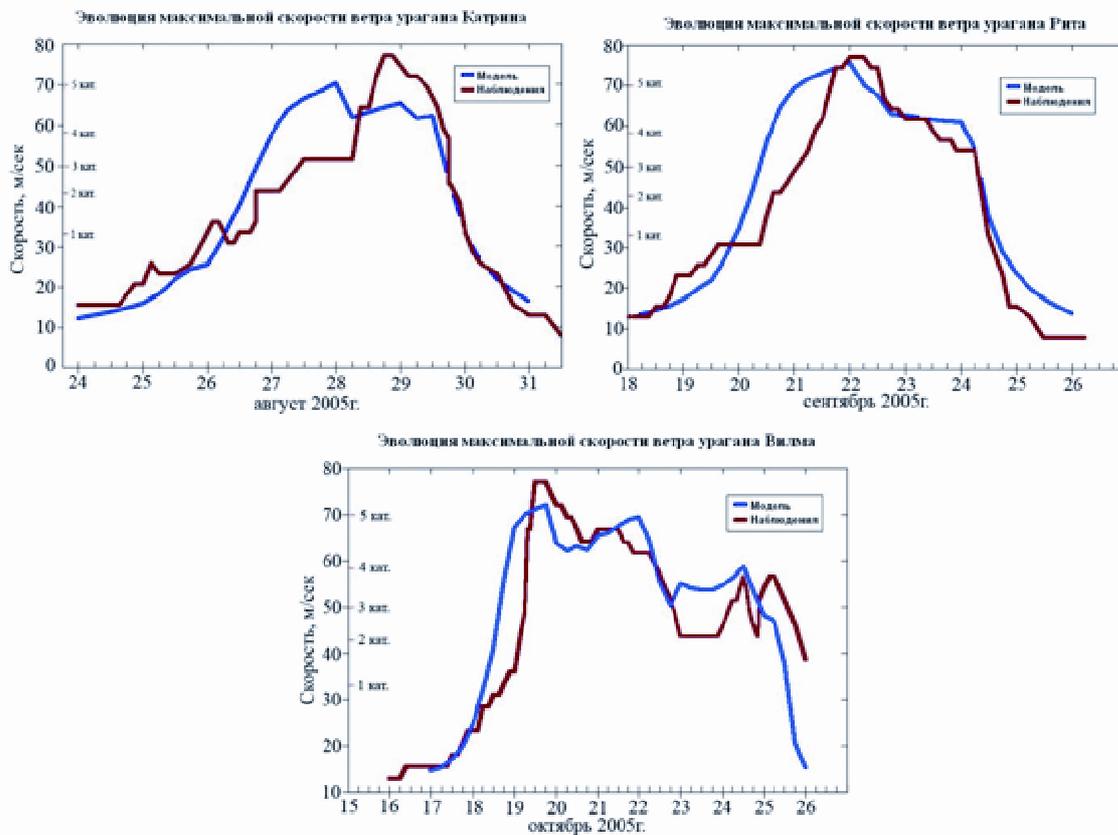


Рис. 5. Результаты численного моделирования сильнейших ураганов 2005 г. на акватории Атлантического океана («Катрина», «Рита», «Вилма»)

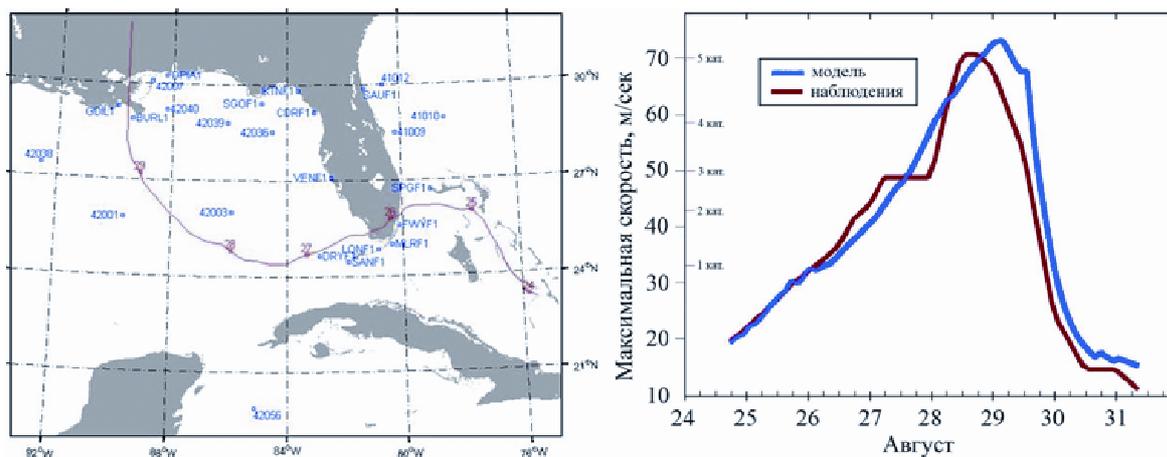


Рис. 6. Эволюция урагана Катрина. Фрагмент оперативной карты метеослужбы США с нанесенным треком урагана (слева) и результаты сравнения данных математического моделирования приповерхностной скорости ветра в урагане с данными наблюдений (справа)

По данным приведенного на левой панели рисунка трека видно, что 26 августа ураган прошел над южной окраиной полуострова Флорида, при этом скорость ветра в нем несколько снизилась. В период с 27 по 29 августа он достиг своего максимального развития и в течение 30-31 августа диссипировал в прибрежной зоне, нанеся сокрушительный урон Луизиане и особенно городу Новый Орлеан.

Следует отметить, что в отличие от «чисто» физической базовой модели, представленной выше, в данном случае использовалась «адаптированная» модель, основывающаяся не только на теоретических предположениях, но и на эмпирических данных о текущем явлении. Дело в том, что даже в случае наиболее полной физической модели такого сложного явления, каким является ураган, существует ряд параметров, имеющих недостаточно четкую интерпретацию. Поэтому важным этапом построения модели была настройка (идентификация) параметров по эмпирическим данным. В разрабатываемой модели этот этап особенно важен, поскольку данные космических наблюдений являются практически единственным источником оперативной информации. На правой панели рис. 6 показан результат моделирования «Катрины» с помощью адаптированной модели. Настройка параметров осуществлялась по данным, полученным 25-26 августа 2005 г. После этого моделирование осуществлялось в автономном режиме. Полученный результат (рис.6) демонстрирует не только увеличение абсолютной точности оценки максимально достигнутой интенсивности, но и уточнение периода наиболее опасной интенсификации (см. данные рис. 5).

Комплексная картина распределения основных физических параметров состояния урагана Катрина в стадии максимального развития по результатам численного моделирования представлена на рис. 7, 8.

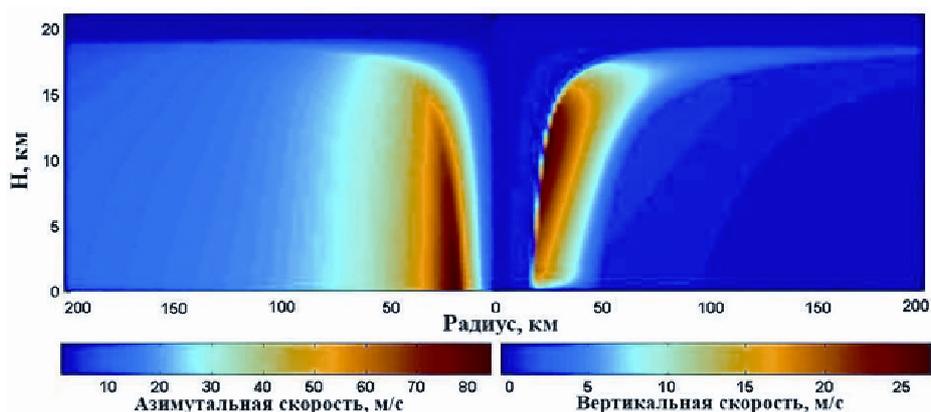


Рис. 7. Распределения азимутальной компоненты скорости ветра (слева) и скорости вертикальных потоков (справа) в урагане Катрина на стадии максимального развития

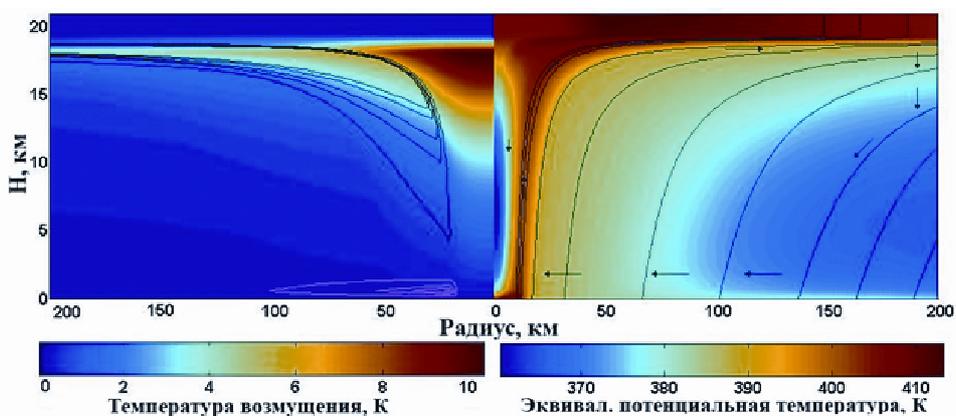


Рис. 8. Дополнительный набор характеристик урагана Катрина для стадии максимального развития, полученный по результатам математического моделирования. Подробное описание отображенных параметров приведено в тексте статьи

На левой панели рис. 7 показано распределение величин азимутальной компоненты скорости ветра. Для «Катрины» максимальные значения составляли приблизительно 85 м/с, что и отражают данные, приведенные на рисунке. Заметим, что ветры в большей части объема урагана - циклонические, но вблизи вершины шторма вращение становится антициклоническим за исключением, возможно, 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). За пределами пояса скорость убывает быстрее. На расстоянии от 100 до 1000 км скорость ветров сравнивается со скоростью невозмущенных атмосферных масс. Максимальная скорость ветра наблюдается около поверхности и медленно убывает вверх по вертикали, меняя направление при достижении вершины шторма. Хотя поток в большей части может быть осесимметричным, около вершины шторма обычно симметрия нарушается. Вверху он, как правило, перераспределяется в одну или несколько «истекающих струй», которые антициклонически изгибаются от центра шторма. Перемещение всего шторма приводит к ассиметрии поля ветра относительно поверхности. В допустимом приближении, скорость ветра относительно поверхности является просто векторной суммой относительной скорости ветра и скорости перемещения самого шторма.

Правая панель на рис. 7 представляет распределение вертикальной скорости. Максимальный восходящий поток наблюдается в вихре около глаза шторма, кольцо глубоко конвективной облачности простирающейся от его края на 20-50 км. Радиус максимальной скорости ветра находится обычно в этой же области. Максимальная скорость восходящих потоков для «Катрины» составляла около 25 м/с на уровне верхней тропосферы. Реальный восходящий поток создается высокими кучево-дождевыми облаками, которые, в слабых штормах, имеют сотовую структуры и характерные размеры около 100 км<sup>2</sup>, а в сильных, формируют осесимметричное кольцо. Известно, что одновременно может существовать два и даже три окружающих глаз вихря, развивающихся по характерному циклу: внешние вихри стягиваются к центру и замещают распадающиеся внутренние вихри.

Развитые ТЦ, каким был ураган Катрина, обычно имеют так называемый глаз, определяемый как практически безоблачная область внутри вихрей. Глаз обычно наблюдается у штормов с ветрами ураганной силы, хотя изредка и более слабые штормы имеют хорошо заметный глаз. Воздушные массы в нем медленно перемещаются вниз, обычно со скоростями 5-10 см/с, хотя во время интенсификации шторма они могут спускаться и гораздо быстрее. На рис.7 глаз можно идентифицировать в центре по слабо отрицательным значениям вертикальной скорости. За пределами вихрей, воздушные массы также в среднем снижаются со скоростью около 2 см/с, но этому обычно препятствуют спиральные рукава кучево-дождевых облаков, где воздушные массы могут подниматься со скоростью нескольких м/с.

На рис.8 приведен дополнительный набор характеристик урагана Катрина. На левой панели рисунка приведены значения температуры возмущения, представляющей разность между температурой в любой точке урагана и температурой внециклонического воздуха на той же высоте. Обращает на себя внимание наличие горячего ядра шторма на больших высотах. В данном случае температура внутри шторма была на 10-11°C выше, чем за его пределами. Контурами изображаются радиальные компоненты движения: фиолетовые контуры на низких уровнях изображают входящий поток, достигающий скорости около 20 м/с, а черным цветом на высоких уровнях показан исходящий поток, который достигает скорости 80-90 м/с. Но, при этом заметим, что над исходящим потоком существует слой слабого входящего потока, опускающегося на внешний край глаза.

При описании постановки задачи моделирования упоминалось наличие двух важных сохраняющихся величин  $M$  и  $s$ , которые играют основополагающую роль в физике ТЦ. Распределения этих величин показаны на правой панели рис.8. Полутона отображают меру удельной энтропии, представленной значениями эквивалентной потенциальной температуры. Как видно из рисунка, энтропия увеличивается к центру, достигая максимума в стене глаза. Заметим, что в центральной

части ТЦ наблюдаются наивысшие значения энтропии, чем где бы то ни было еще на уровне морской поверхности. При больших значениях радиуса распределение значений энтропии приближается к характеристикам невозмущенной тропической среды, спадая по мере подъема от поверхности и достигая минимума на уровне нескольких километров над поверхностью. Выше этого уровня энтропия растет с высотой, более быстро в стратосфере. Заметим, также, сильные радиальные градиенты энтропии в стене глаза. Черные контуры на рисунке отображают распределение абсолютного момента импульса на единицу массы относительно оси шторма. В отсутствии циркуляции  $M$  – просто функция радиуса, и контуры  $M$  вертикальны. Заметим, что  $M$  уменьшается по направлению вверх и внутрь и имеет очень сильный градиент в стене глаза. Это следствие сильного фронтообразования, которое здесь происходит. Стрелки указывают направления перемещения воздушных масс в этой плоскости.

Результаты математического моделирования основных характеристик эволюции ураганов очень полезны для описания физики и энергетики ТЦ, для более полного понимания сущности происходящих процессов. Детальное моделирование уже прошедших ураганов позволяет оценить адекватность используемых методов, наметить пути дальнейшего совершенствования модели, а также методов возможных активных воздействий.

### Заключение

На основе проведенного расчетно-теоретического исследования выявлены важные особенности взаимодействия ураганов с окружающей средой. В результате детального рассмотрения тропического циклогенеза уточнен набор потенциальных предикторов и намечены пути дальнейшего совершенствования моделей, описывающих основные характеристики энергетики ураганов.

Получены результаты, подтверждающие интенсификацию активности ураганов вследствие глобального потепления. Величина индекса PDI, базирующегося на оценке полной диссипации энергии, значительно росла, начиная с середины 70-х годов, что связано, как с более продолжительным временем жизни ураганов, так и большей их интенсивностью. Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что дальнейшее потепление глобальной климатической системы может привести к продолжающемуся росту потенциальной разрушительной способности ТЦ.

Реализована компьютерная модель урагана как физического явления с использованием набора ключевых физических параметров, определяющих текущее энергетическое состояние. Математическое моделирование сильнейших ураганов 2005 г. на акватории Атлантического океана («Катрина», «Рита», «Вилма») продемонстрировало хорошее соответствие рассчитанных и наблюдаемых значений приповерхностной скорости ветра. Показано, что предложенная в работе модель средней сложности дает правильный ход развития уже возникшего ТЦ, эволюцию его энергетических характеристик и разрушительной силы.

### Литература

1. Головки В.А. «Математическое моделирование активности ураганов по данным радиационных наблюдений из космоса». Исследование Земли из космоса, №5, 2006, с. 12-37.
2. Southern R.L. The global socio-economic impact of tropical cyclones. Aust. Meteorol. Mag. 27, 1979, p.175–195.
3. Emanuel K.A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 2005, p.686-688.
4. Camargo, S. J., and A. H. Sobel, 2005: Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J. Climate*, 18, p.2996–3006.
5. Emanuel K.A. The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1995, p.3959-3968.