

# Физическая модель и статистическая ансамблевая оценка рисков ураганов по данным космических наблюдений

В.А. Головки<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.ector.mipt.ru](mailto:kondr@kondr.ector.mipt.ru)*

Рассматривается новый подход к оценке возможных рисков разрушительной способности ураганов, который базируется на расчетно-теоретическом исследовании физических особенностей и статистических закономерностей проявления на прибрежных акваториях мощных атмосферных вихрей. В качестве исходных экспериментальных данных в модели используются результаты спутниковых наблюдений этих явлений, в том числе полученные в последние годы новейшей аппаратурой дистанционного зондирования. В основе подхода к получению количественной оценки вероятностей выхода на сушу ураганов с заданной величиной максимальной скорости ветра лежит комбинация статистического метода генерации треков путем случайного розыгрыша с детерминированным методом определения максимальной скорости ветра вдоль синтезированных треков.

## Введение

При расчете экономических рисков повышение информативности и достоверности количественных оценок воздействия разрушительных ветров тропических ураганов (тайфунов) на прибрежные регионы океанских акваторий имеет определяющее значение. Анализ существующих методик [1] по оценке рисков разрушительных воздействий ураганов показывает, что в ряде прибрежных зон (в том числе и на дальневосточном побережье РФ) в виду относительной редкости появления этих аномальных природных явлений и сравнительно небольшого периода регулярных наблюдений невозможно получить состоятельные оценки этих рисков традиционными статистическими методами.

Однако имеющиеся более чем шестидесятилетние ряды данных наблюдений (начиная с 1945 г.) позволяют получить обобщенные пространственно-временные характеристики эволюции самих ураганов. Статистические модели (генезиса, траекторий движения и областей диссипации) ураганов, созданные на основе этих данных, позволяют разработать компьютерные методы синтеза заданного числа виртуальных треков ураганов. Необходимым условием генерации таких треков является требование соответствия статистических характеристик полученного таким образом ансамбля реализаций виртуальных ураганов характеристикам исходного ряда натуральных наблюдений.

Основу принципиальной возможности оценки вероятностей выхода на сушу ураганов с заданной величиной максимальной скорости ветра может составить оптимальная комбинация статистического метода генерации виртуальных треков с детерминированным методом определения вдоль них максимальной скорости ветра на базе физической модели [2].

Главным информационным ресурсом при решении этой задачи являются ряды космических наблюдений. В первую очередь спутниковые данные, начиная с 1970-х годов, используются для определения характеристик самих ураганов (локализации, параметров движения, интенсификации и диссипации). Кроме того, на основе многоспектральных спутниковых измерений восстанавливаются все сопутствующие геофизические параметры окружающей ураганы среды (вертикальные профили температуры, влажности, температура поверхности океана, сдвиг ветра, турбулентность, характеристики уходящего излучения). Все перечисленные параметры, оформленные в виде баз

данных, используются при реализации как статистического, так и детерминированного блоков расчетной схемы.

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 [3]. 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 [4]. Известно, что 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 скорости ветра значительно превышали 60 м/с) [3].

### Новый подход к оценке возможных рисков воздействия ураганов

Используемые страховыми компаниями схемы оценки финансовых рисков, связанных с последствиями разрушительных тропических ураганов, как правило, основываются на оценках ущерба по уже имевшим место прецедентам [1]. Однако даже для тех прибрежных территорий, где выход на сушу тропических циклонов является достаточно частым явлением, эмпирические функции распределения вероятностей таких событий могут иметь существенные погрешности в области наиболее интенсивных, но сравнительно редких прецедентов. Реализуемый новый подход комплексного статистико-детерминированного моделирования потенциальных рисков ураганов по данным космических наблюдений позволяет существенно минимизировать погрешности оценок для наиболее интенсивных и, таким образом, самых опасных ураганов.

#### *Статистический блок синтетической модели*

Статистический блок синтезирования треков можно условно представить в виде двух сегментов: 1) процедуры «возникновения трека», использующей сглаживание (трехмерным гауссовым ядром) функции распределения вероятностей генезиса, восстановленной на основе дискретных пространственно-временных данных об ураганах; 2) процедуры «распространения трека» с 6-ти часовым интервалом в виде цепи Маркова с принятием решения на каждом шаге о продолжении или завершении трека.

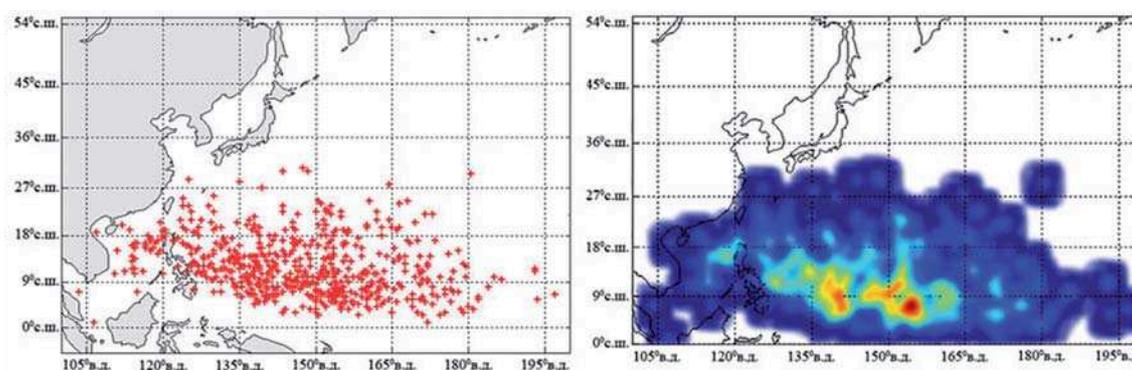


Рис. 1. Локализация (слева) и сглаженная плотность распределения (справа) зарождения реальных ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана

На рис. 1 приведены реальные данные о местах возникновения тайфунов и сглаженная функция распределения вероятностей генезиса для северо-западной акватории Тихого океана. Алгоритм расчета характеристик «распространения трека» схематически представлен на рис. 2.

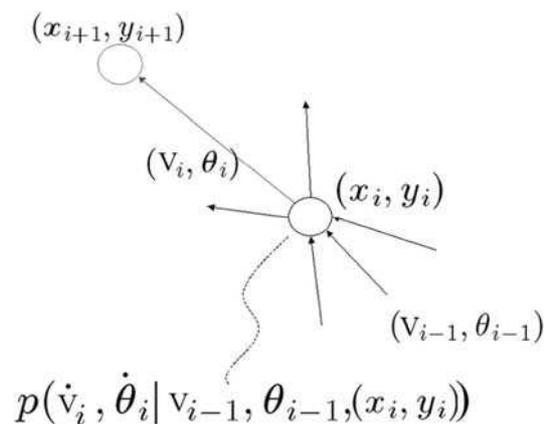


Рис. 2. Синтез трека урагана методом цепей Маркова

Здесь  $V$  и  $\theta$  – скорость и азимутальное направление движения ТЦ, а  $(x, y)$  – текущее положение. Изменения скорости и направления движения ТЦ разыгрываются из статистики ансамбля реальных штормов. Пример синтезированного ансамбля треков тайфунов с прицельным интервалом на побережье, соответствующим окрестности портового города Владивосток, показан на рис. 3.

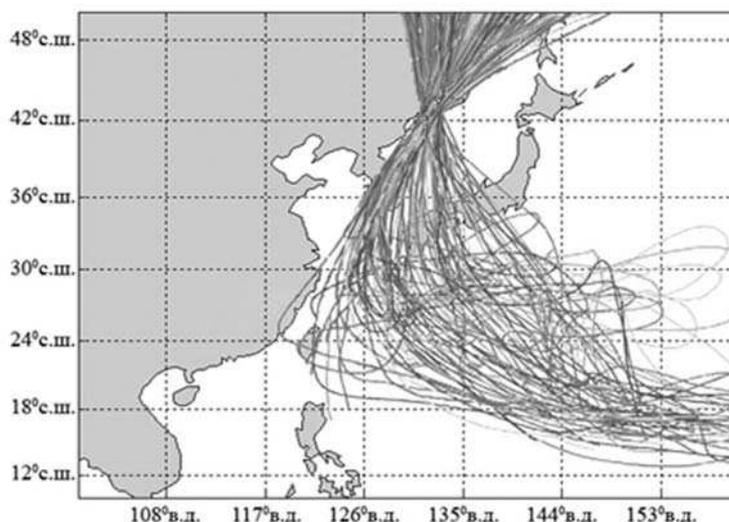


Рис. 3. Пример синтезированного ансамбля треков тайфунов методом цепей Маркова

Процедура генерации статистически значимого количества треков ураганов путем случайного розыгрыша с использованием цепей Маркова позволила получить ряд важных оценок, которые можно рассматривать как основу для дальнейших исследований. Однако требования объективности и надежности получаемых оценок потенциальных рисков ураганов обуславливают необходимость использования также других независимых методов формирования ансамбля синтетических треков [5]. Одним из альтернативных подходов к генерации треков является реализация статистического блока на основе синтезированных временных рядов воздушных потоков на высотах 250 и 850 гПа (сдвига ветра), подчиняющихся статистике космических наблюдений. Сравнение и анализ результатов, полученных при использовании принципиально различных методов построения ансамбля синтетических треков, будут способствовать повышению устойчивости и достоверности получаемых оценок рисков.

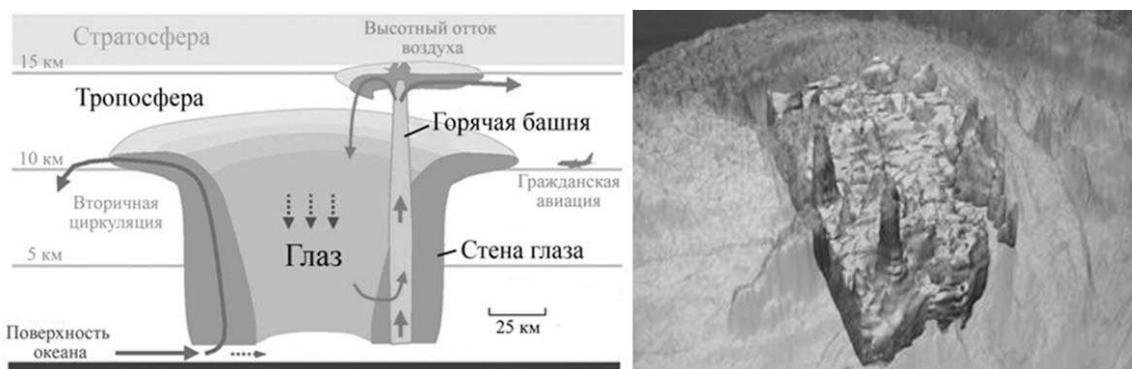
Результаты, получаемые с помощью разрабатываемой синтетической модели, могут быть представлены в виде гистограмм числа вышедших на сушу ураганов с заданной величиной максимальной скорости ветра в определенной окрестности (~100 км) заданной точки побережья.

Особую опасность для населения представляет неожиданная интенсификация ураганов непосредственно перед их выходом на сушу. Решению проблемы адекватной диагностики интенсификации ТЦ может способствовать использование компьютерных математических моделей урагана как физического явления с использованием всего доступного набора геофизических параметров, определяющих текущее энергетическое состояние.

#### *Физический блок синтетической модели*

Физический (детерминированный) блок реализуется на базе разработанной модели расчета максимальной скорости ветра вдоль трека с учетом определяющего набора геофизических параметров окружающей среды [3, 4]. Основным информационным ресурсом для моделирования являются длительные ряды наблюдений, полученные в основном с помощью космических систем. Метеоспутники используются для наблюдений за ТЦ с середины 60-х годов. Хотя космические наблюдения кардинально улучшили наблюдения за движением этих смертоносных штормов, надежные оценки их разрушительной энергии на базе спутниковых измерений все еще труднодостижимы. В качестве характеристики интенсивности ТЦ и, таким образом, их потенциальной разрушительной способности используется максимальная средняя скорость ветра, определяемая как скорость ветра на высоте 10 м на протяжении 1 мин. Но, эту меру интенсивности урагана оказывается очень трудно связать с результатами радиометрических измерений со спутников. Чтобы разрешить эту проблему, был разработан эмпирический подход [6] для оценки максимальной скорости ветра, использующий метод распознавания образов облаков на космических изображениях, который был откалиброван с помощью самолётных данных.

Особенностью современного подхода к совершенствованию физико-математической модели урагана является использование получаемых в последние годы новейшими космическими системами (пассивными и активными) многоспектральных данных о состоянии атмосферных образований. Так, например, начиная с запуска в 1997 г. космической системы TRMM, стали доступны данные о «внутреннем» 3-х мерном распределении осадков и скрытой теплоте парообразования в ураганах. В основу формирования рядов наблюдений были положены измерения, получаемые с помощью микроволнового радиометра ТМІ (TRMM Microwave Imager) и радара осадков PR (Precipitation Radar). Эти данные позволили, в частности, идентифицировать «тепловые башни» (экзотермические глубоко конвективные облака, вырастающие в высоту до 16 км) в стене глаза урагана и являющиеся предвестниками интенсификации ветра. 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. Схематически формирование тепловых башен и результат их 3D-реконструкции на основе данных TRMM в период максимальной интенсификации урагана Катрина показаны на рис. 4.



*Рис. 4. Формирование тепловой башни в стене глаза урагана (слева) и экзотермические глубоко конвективные облака (тепловые башни высотой до 16 км) в стене глаза урагана Катрина 28 августа 2005 г., когда интенсивность достигла 5-ой категории (справа)*

Существенным шагом вперед в области интерпретации спутниковых данных стал физико-статистический метод определения интенсивности развитых ТЦ, который связал положительную аномалию радиояростной температуры для полосы кислорода ( $\lambda 55$  ГГц) с градиентом давления и со скоростью ветра у поверхности. Последние исследования [7] расширили и уточнили этот метод, используя данные прибора Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). 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 в 8-ом канале (55.5 ГГц), и интенсивностью ТЦ. Регрессионный алгоритм использует эту взаимосвязь для оценки минимального давления тропического циклона у поверхности, а, следовательно, и интенсивности урагана. На рис. 5 показан пример восстановления температурных аномалий в сечении урагана Флойд и характеристики регрессионной связи измерений в 8-ом канале AMSU-A с минимальным давлением у поверхности. Измерения, получаемые с помощью аппаратуры AMSU-A современных спутников США, позволили оперативно анализировать термические аномалии в поперечном сечении ураганов и обеспечили существенное повышение точности оценки их интенсивности. В частности для северо-западной акватории Тихого океана этот метод позволил вдвое снизить СКО погрешность оценки минимального приповерхностного давления с 11.1 гПа (для классического метода [5]) до 4.7 гПа.

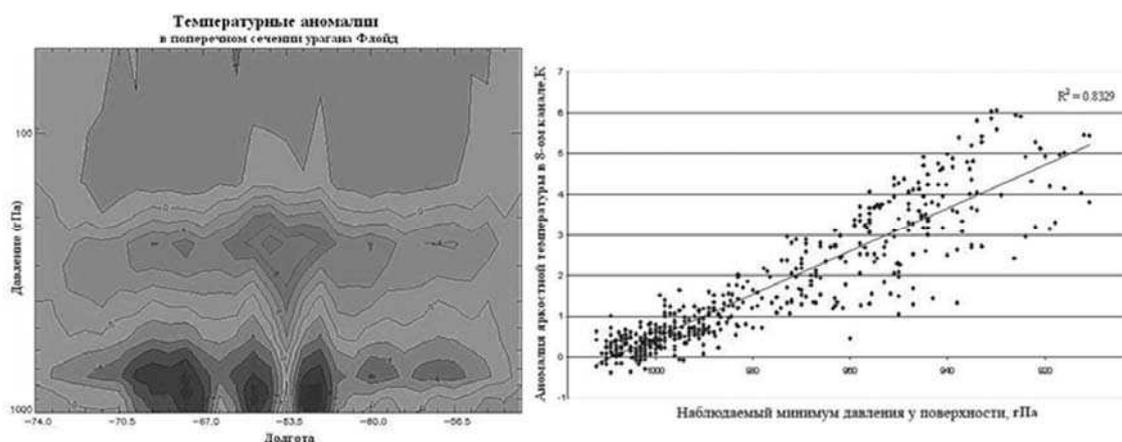


Рис. 5. Пример восстановления температурных аномалий в сечении урагана Флойд (слева) и характеристики регрессионной связи измерений в 8-ом канале AMSU-A с минимальным давлением у поверхности океана (справа)

Но поистине революционный прорыв в понимании физики ураганов наступил с вводом в действие системы новейших спутников Aqua, CloudSat, CALIPSO, PARASOL и Aura, так называемого космического «А-поезда» (A-Train). На рис. 6 показана последовательность орбитального движения КА «А-поезда».

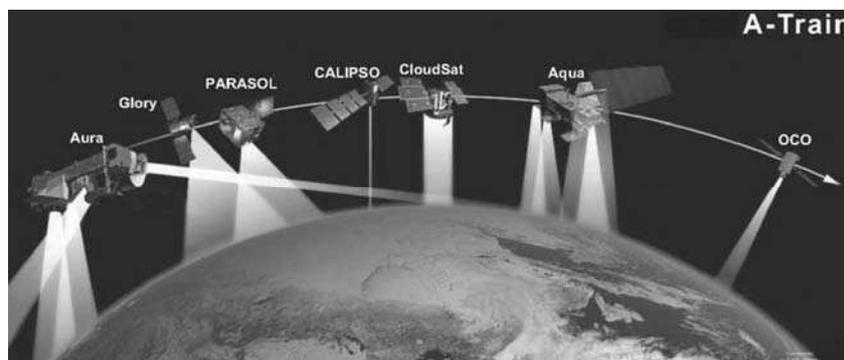


Рис. 6. Последовательность орбитального движения космических систем «А-поезда»

С помощью новейших приборов восстанавливаются существенные для повышения достоверности разрабатываемых моделей геофизические параметры не только собственно вихря, но и окружающей среды.

Модель тропических циклонов предлагает новую физическую основу для оценки интенсивности тропических циклонов [8]. Аппроксимируя ураган как вихрь, находящийся в градиентном и гидростатическом равновесии, для максимальной скорости ветра в урагане можно получить выражение:

$$V_m^2 \approx \frac{T_s - T_0}{T_0} \Delta h^* \quad (1)$$

где  $T_s$  и  $T_0$  — температура поверхности океана и температура верхней границы облачности, соответственно,  $\Delta h^*$  — изменение статической энергии насыщения водяным паром  $C_p T + gz + L_v$  на верхней границе облачности, с  $h_{eyewall}^*$  на границе «глаза урагана» к  $h_0^*$  во внешней зоне. Заметим, что значение  $V_m$ , получаемое из (1), это максимальная мгновенная скорость градиентного ветра на высоте 1-2 км выше поверхности. Оценка же приповерхностного ветра может быть получена путем уменьшения значения приблизительно на 20%. Вычисление (1) требует одновременных точных измерений высоты облачного покрова и температуры на верхней границе облачности над ураганом.

На основе новых данных, полученных с помощью спутниковой группировки «А-поезда», мы теперь можем вычислить все необходимые параметры (1) из данных космических наблюдений и таким образом оценить насколько хорошо данный метод позволяет оценить интенсивность реального шторма.

Для оценки температуры на верхней границе облачности используются данные яркостной температуры в ИК-канале (11 мкм) спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на КА Aqua из той же группировки «А-поезда» что и CloudSat. Временной интервал получения данных над ураганом с помощью в КА Aqua и КА CloudSat составляет в среднем 1 мин. (60 с.). Высота верхней границы облачности восстанавливается из данных радара CPR (cloud profiling radar) КА CloudSat. Спутник CloudSat был запущен 28 апреля 2006 года. На нём впервые был установлен радар с миллиметровой длиной волны для получения трёхмерных изображения облаков, работающий на частоте 94 ГГц. Эффективное вертикальное разрешение этого радара — 480 м, с избыточной дискретизацией — 240 м. Данные, после предварительной обработки распространяются в формате уровня 2B-geoprof. На рис. 7 показан пример

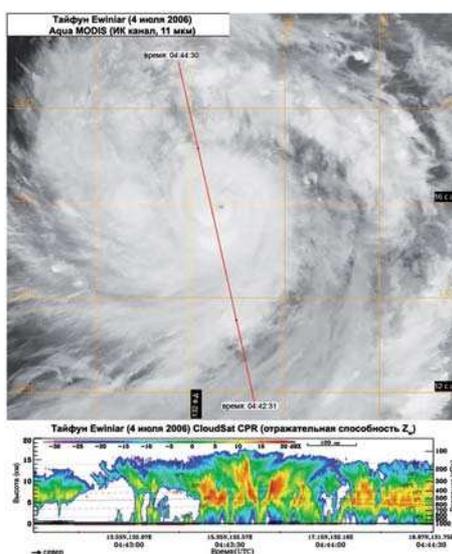


Рис. 7. Пример совместного использования данных MODIS (Aqua) и CPR (CloudSat) для прямой оценки интенсивности урагана

данных для тайфуна Ewiniar в северо-западной акватории Тихого океана 4 июля 2006 г. Для оценки  $\Delta h^*$  использовались данные о высоте верхней границы облачности и температуре в разнесенных конвективных областях. В результате для  $\Delta h^*$  была получена оценка 9 К или 9 кДж/кг. Подставляя это значение совместно со значениями  $T_s$  и  $T_0$  в (1), получаем оценку максимального ветра — 63 м/с, что близко к значению из контрольной базы данных «Best Track» — 58 м/с.

Полученные предварительные результаты выглядят весьма обнадеживающими. Однако самым важным достоинством этой физической модели является подтвержденная возможность прямой оценки интенсивности ураганов на основе данных только космических наблюдений.

## Заключение

Ураганы являются одними из самых опасных и разрушительных природных явлений для человечества. Новый подход к оценке возможных рисков воздействия ветров ураганов (тайфунов) на заданные прибрежные территории состоит в многократных прогонах модели урагана, учитывающей взаимодействие океана с атмосферой, вдоль большого числа треков, синтезированных статистическим методом.

Используемый статистический подход к генерации синтетических треков реализовывался в три этапа. Сначала путем реконструкции на основе дискретных пространственно-временных данных о местах возникновения ураганов была построена сглаженная функция распределения вероятностей генезиса. Далее с помощью цепей Маркова, учитывающих скорость и направление движения, прослеживалось распространение треков с 6-ти часовым интервалом, при этом после каждого шага принималось решение о продолжении или завершении трека. На заключительном этапе для иллюстрации возможностей данного метода был сформирован статистически значимый ансамбль синтетических треков ураганов, проходящих в окрестности дальневосточного портового города Владивосток.

Оценка интенсивности ураганов вдоль синтетических треков осуществлялась с помощью детерминированного математического моделирования с использованием физической модели урагана. В основу построения модели был положен балансовый подход к учету двух квазисохраняющихся величин в атмосфере (абсолютного момента импульса относительно оси урагана и удельной энтропии), согласованных с характеристиками верхнего слоя океана. Для каждого трека прогноз текущей скорости ветра осуществлялся в ходе интегрирования модели по времени. Таким способом оценивалась максимально возможная скорость ветра вышедших на сушу ураганов в определенной окрестности (~100 км) данной точки побережья.

С помощью данных новейших приборов космической группировки A-Train появилась возможность восстанавливать важные для повышения достоверности разрабатываемых моделей геофизические параметры не только собственно вихря, но и окружающей среды. К числу достигнутых в последнее время улучшений имеющейся физической модели следует отнести возможность усвоения данных современных альтиметров и радиометров, позволяющих учитывать радиальные градиенты высот верхней границы облаков и температуры от ядра урагана к его периферии. Эти усовершенствования способствуют существенному повышению точности оценки интенсивности ураганов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 07-01-00507а.

## Литература

1. Vickery, P. J., Skerj P. F., Twisdale L. A. Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model. // J. Struct. Eng., 2000, 126, pp.1222–1237.

2. Головки В.А., Кондранин Т.В. Физическая модель и статистическая ансамблевая оценка рисков ураганов по данным космических наблюдений // Сб. тезисов Пятой юбилейной открытой всероссийской конференции «Дистанционное зондирование Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007, ([theses\\_5\thesis\\_908.html](#)).
3. Головки В.А., Кондранин Т.В. Математическое моделирование аномальных природных явлений в динамически неустойчивой климатической системе Земли по данным радиационных наблюдений из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып.4. Т. II. С.74-83.
4. Головки В.А. Математическое моделирование активности ураганов по данным радиационных наблюдений из космоса // Исследование Земли из космоса, 2006. №5. с.12-37.
5. Emanuel K.A., Ravela S., Vivant E., Risi C. A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2006, vol. 87, no. 3, pp. 299–314.
6. Dvorak V.F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery // *Mon. Weather Rev.*, 1975, vol. 103, no. 5, pp. 420–430.
7. Demuth J.L., DeMaria M., Vonder Haar T.H. Evaluation of Advanced Microwave Sounding Unit tropical-cyclone intensity and size estimation algorithm // *J. Appl. Meteorol.*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 282–296.
8. Wong V., Emanuel K.A. Use of cloud radars and radiometers for tropical cyclone intensity estimation // *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. 12, L12811.