

Возможность предсказания образования тропических циклонов и ураганов по данным спутниковых наблюдений

И.В. Мингалев¹, Н.М. Астафьева², К.Г. Орлов¹, В.С. Мингалев¹, О.В. Мингалев¹,
В.М. Чечеткин³

¹Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН,
184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а
E-mail: mingalev_i@pgia.ru;

²Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: ast@iki.rssi.ru;

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
125047, Москва, Миусская площадь, 4
E-mail: chechet@spp.keldysh.ru

На основании результатов численного моделирования формирования циклонических вихрей в области внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), а также анализа данных микроволнового спутникового мониторинга (глобальных радиотепловых полей Земли из электронной коллекции GLOBAL–Field) и данных о ветре в области ВЗК предлагается методика прогноза образования тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-01-00451.

Ключевые слова: зарождение тропических ураганов, циклонические вихри, численное моделирование.

Введение

Работа посвящена исследованию процессов зарождения тропических циклонов и является продолжением работы (Мингалев и др., 2010). Изучается процесс формирования первичного циклонического крупномасштабного вихря в нижней атмосфере на тропических широтах, из которого в дальнейшем может развиваться тропический циклон или ураган. Проведен анализ данных спутникового мониторинга, в частности, серий радиотепловых полей Земли из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL–Field (<http://www.iki.rssi.ru>) (Астафьева и др., 2006, 2008), позволяющих изучать структуру атмосферных движений в широком диапазоне пространственно–временных масштабов (Астафьева, Раев, 2009, 2010; Астафьева, Хайруллина, 2010). Проведенный анализ показал, что первичные циклонические вихри, из которых развиваются циклоны и ураганы, часто формируются во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК) после возникновения волнообразно искривленных участков ВЗК длиной от 700 км и более. При этом не каждый зародившийся крупномасштабный циклонический вихрь развивается в тропический циклон – иногда эти вихри затухают, просуществовав в течение 2–3 суток.

ВЗК – промежуточная зона преимущественно восточных ветров экваториальной барической ложбины между пассатами Северного и Южного полушарий шириной несколько сотен километров (статистически значимая граница между меридиональными циркуляционными ячейками Хедли). В период наибольшей циклонической активности в тропиках Северного полушария с июня по сентябрь ВЗК смещается к северу от экватора на 5–15 градусов и заметно сужается. В этот период к северу от ВЗК в диапазоне высот от поверхности до ~ 3 км

меридиональная составляющая ветра направлена на юг, а зональная – на запад, причем она быстро увеличивается при продвижении на юг за счет действия силы Кориолиса, достигая значений более 30 м/с на северной границе ВЗК. В тот же период к югу от ВЗК в том же диапазоне высот горизонтальная составляющая ветра ведет себя следующим образом: на экваторе ветер направлен примерно на северо-запад; при продвижении на север сила Кориолиса поворачивает поток на восток так, что вблизи южной границы ВЗК зональная составляющая имеет небольшую абсолютную величину (менее 5 м/с) и может быть направлена как на запад, так и на восток. Таким образом, в этот период в ВЗК имеется сдвиговое зональное течение. Разница между значениями зональной компоненты ветра на границах этого течения лежит обычно в пределах 25–35 м/с. Над Африкой в этот период часто возникают волнообразно искривленные участки ВЗК длиной от 800 до 1500 км и изгибом на север примерно на 100–300 км и более. Появление подобных искривленных участков ВЗК должно приводить к неустойчивости, результатом развития которой является образование крупномасштабных горизонтальных вихрей – некоторые из них в дальнейшем развиваются в тропические циклоны и ураганы. В данной работе излагаются результаты численного моделирования развития неустойчивости в движении воздушных масс в районе ВЗК при наличии в начальный момент описанных выше искривленных участков ВЗК и при начальном распределении скорости ветра, характерном для периода активного циклогенеза с июня по сентябрь. Проводится сравнение полученных результатов с данными микроволнового спутникового мониторинга (радиотепловыми полями Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field) и предлагается методика предсказания образования тропических циклонов.

Для численного моделирования используется созданная авторами 3-мерная региональная модель циркуляции атмосферы. Варианты этой модели с другими размерами области моделирования по горизонту использовались в работах (Белоцерковский др., 2006; Белоцерковский и др., 2009; Мингалев и др., 2010б).

Описание модели

В модели учитываются процессы нагрева – охлаждения воздуха за счет поглощения – испускания инфракрасного излучения, а также за счет фазовых переходов водяного пара в микрокапли воды и частицы льда, которые играют важную роль. Также учитывается оседание микрокапель воды и частиц льда в поле силы тяжести. Атмосферный газ рассматривается как смесь воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли двух видов: первый состоит из микрокапель воды, а второй – из микрочастиц льда. Микрокапли воды и микрочастицы льда считаются сферами радиусов 0,1 мм и 0,3 мм, соответственно, движущимися относительно смеси воздуха и водяного пара со скоростями осаждения, определяемыми по формуле Стокса с поправкой Каннигэма. Выбранные размеры частиц аэрозолей соответствуют реальным средним размерам частиц в облаках. Температуру смеси и частиц аэрозолей считается одинаковой. Предполагается, что аэрозоль из капель воды может присутствовать только при условиях насыщенности водяного пара и температуре не менее 273,15 К, а аэрозоль из частиц льда – только при условиях насыщенности водяного пара и температуре не более 273,15 К. При температуре 273,15 К температура среды не может увеличиться, пока не расплавятся все частицы льда, и не может уменьшиться, пока не замерзнут все капли воды.

Система уравнений модели и метод ее численного решения детально описаны в работах (Белоцерковский и др., 2006, 2009; Мингалев и др., 2010а, 2010б). В каждом узле расчетной сетки вычисляются температура, плотность воздуха, плотность водяного пара, гидродинамическая скорость смеси, а также массы в единице объема водяных капель и микрочастиц льда. В систему уравнений модели входят уравнения неразрывности для воздуха и для полного содержания воды во всех фазовых состояниях, уравнение для 3-мерного вектора объемной плотности импульса воздуха и уравнение для объемной плотности полной энергии, которая определяется с учетом скрытой теплоты фазовых переходов водяного пара. Все уравнения используются в консервативной форме. Область моделирования в настоящей работе – это часть шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности с размерами по высоте от поверхности Земли до 15 км, по долготе 36° , а по широте 25° ; южная граница области моделирования находится на 5° ю.ш. Расчетная сетка выбрана равномерной с шагом по широте и долготе, равным $0,04$ градуса, и с шагом по высоте – 200 м.

На нижней границе области моделирования заданы: условие прилипания, условие насыщенности воздуха водяным паром, поток тепла, пропорциональный разности температур воздуха и поверхности воды, и восходящий поток теплового излучения, пропорциональный 4-й степени температуры поверхности (температура поверхности океана считалась постоянной и равной 25°C). На верхней границе области моделирования заданы: нисходящий поток теплового излучения, нулевая вертикальная компонента скорости ветра (непротекание), нулевые значения производных по высоте от горизонтальных компонент скорости ветра (проскальзывание) и от вертикальной компоненты вектора потока тепла.

На северной и южной вертикальных границах области моделирования вертикальная и зональная компоненты скорости ветра считаются заданными. Вертикальная компонента скорости полагается равной нулю, зональная – равной -5 м/с (направлена с востока на запад). Меридиональная компонента скорости на высотах ниже 3 км задана и направлена внутрь области моделирования, на высоте 3 км равна нулю, а выше 3 км задана равной нулю 1-ая производная от этой компоненты в меридиональном направлении. Температура воздуха на северной и южной вертикальных границах также считается заданной. В тех точках границы, где воздух втекает в область моделирования, его плотность считается заданной, а в тех точках границы, где воздух вытекает из области моделирования, его плотность рассчитывается с использованием условия равенства нулю 1-ой производной плотности вдоль нормали через границу.

На восточной вертикальной границе области моделирования заданы постоянные по времени значения всех компонент скорости ветра, температуры, плотности воздуха и содержание в нем водяного пара, а также нулевое содержание микрокапель воды и частиц льда. Заданные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе ВЗК в период с июня по сентябрь. Меридиональная компонента направлена к центру ВЗК на высотах менее 3 км и от центра ВЗК на высотах более 3 км. К северу от ВЗК зональная компонента ветра направлена на запад, причем величина ее растет при приближении к центру ВЗК. К югу от ВЗК зональная компонента ветра также направлена на запад, но ее величина убывает при приближении к центру ВЗК до 1 м/с. Плотность воздуха на восточной границе удовлетворяет условию гидростатического равновесия. Вертикальная компонента ветра определяется из уравнения неразрывности. Вне центральной области ВЗК она равна нулю, а над этой областью направлена вверх, достигая максимальных значений над центром ВЗК. На западной вертикальной границе задаются нулевые значения производной вдоль нормали к границе от всех переменных.

Начальные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе ВЗК и задаются так же, как на восточной границе, являясь продолжением граничных условий внутрь области моделирования. При этом ВЗК задавалась с изгибами, размер и форма которых соответствовали данным спутниковых наблюдений. Содержание водяных капель и микрочастиц льда в воздухе в начальный момент полагалось равным нулю во всей области моделирования. Начальная температура задавалась горизонтально однородной, а ее зависимость от высоты определялась по эмпирической модели NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) для центра расчетной области. Начальная плотность воздуха и начальная плотность водяного пара также задавались горизонтально однородными. Значение начальной плотности воздуха на поверхности определялось по эмпирической модели NRLMSISE-00 для центра расчетной области. Зависимости начальных плотностей воздуха и водяного пара от высоты определялись из условия гидростатического равновесия и насыщенности водяного пара, соответственно.

Результаты моделирования и их сравнение с данными наблюдений

Проведено численное моделирование эволюции течения при разных изгибах ВЗК в начальный момент. На рис. 1 представлены результаты моделирования для случая, когда в начальный момент ВЗК имеет искривленный участок длиной примерно 1000 км, отклоняющийся на 100 км на север относительно остальной части ВЗК, и при этом западный склон искривленного участка ВЗК существенно короче, чем восточный склон.

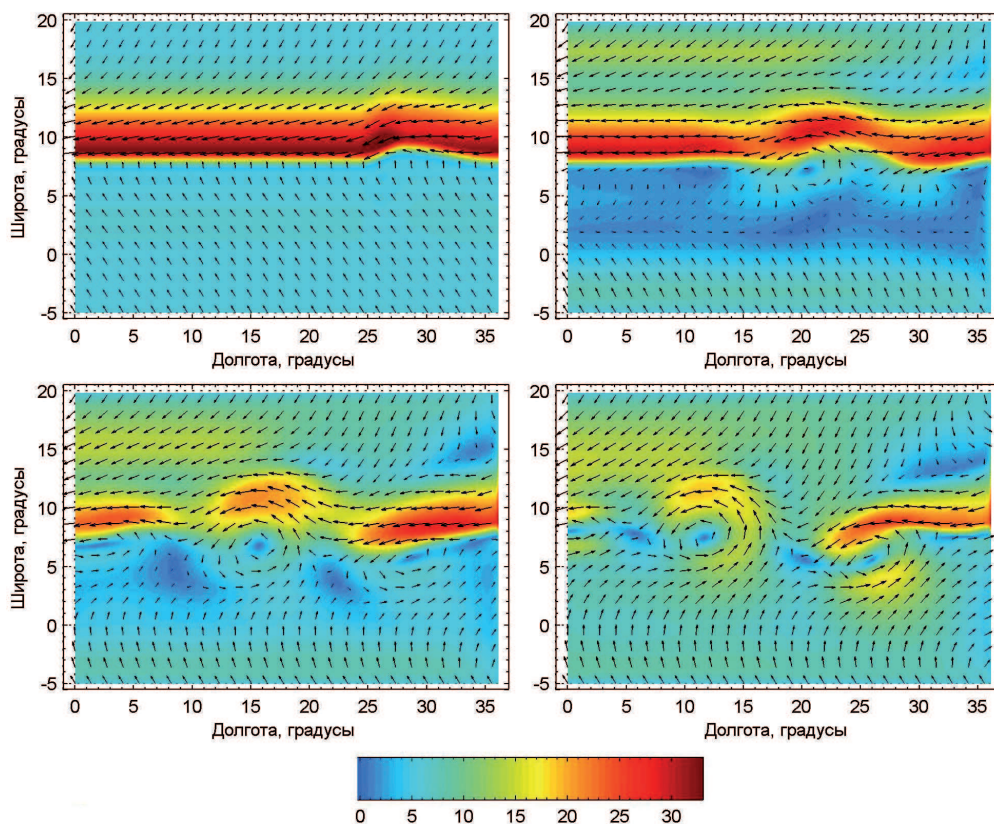


Рис. 1. Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра в (м/с) на высоте 600 м в начальный момент (слева сверху) и в моменты времени через 15 часов (справа сверху), через 30 часов (слева внизу) и через 45 часов (справа внизу) после начала моделирования; стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона – абсолютную величину скорости

Центральная область ВЗК на рис. 1 в начальный момент представляет собой вытянутую с запада на восток на широте 8° с.ш. полосу шириной примерно в 1 градус. При переходе через эту полосу горизонтальный ветер меняет направление и величину. Западнее 25 градусов долготы виден изгиб этой полосы. Через 15 часов после начала моделирования (см. рис. 1 справа сверху) происходит развитие начального возмущения, и формируется горизонтальный циклонический вихрь с центром, лежащим примерно на широте $7,5^\circ$ и долготе $20,5^\circ$. Через 30 часов после начала моделирования (см. рис. 1 слева внизу) этот вихрь достиг размеров примерно 800 км в диаметре, а центр его переместился в точку на широте примерно 7° и долготе $15,5^\circ$ (то есть переместился примерно на 500 км на запад). К этому моменту сформировался второй циклонический вихрь с центром, лежащим примерно на широте 6° и долготе 29° . В момент через 45 часов после начала моделирования (см. рис. 1 справа внизу) первый вихрь сохранил свои размеры, а его центр лежит на широте примерно $7,5^\circ$ и долготе $11,5^\circ$ (т.е. переместился еще на 300 км на запад). Второй вихрь к этому моменту достиг размеров 700 км в диаметре, а его центр лежит примерно на широте 6° и долготе 26° (т.е. переместился примерно на 300 км на запад). Скорость ветра в обоих вихрях достигает значений 20 м/с и более.

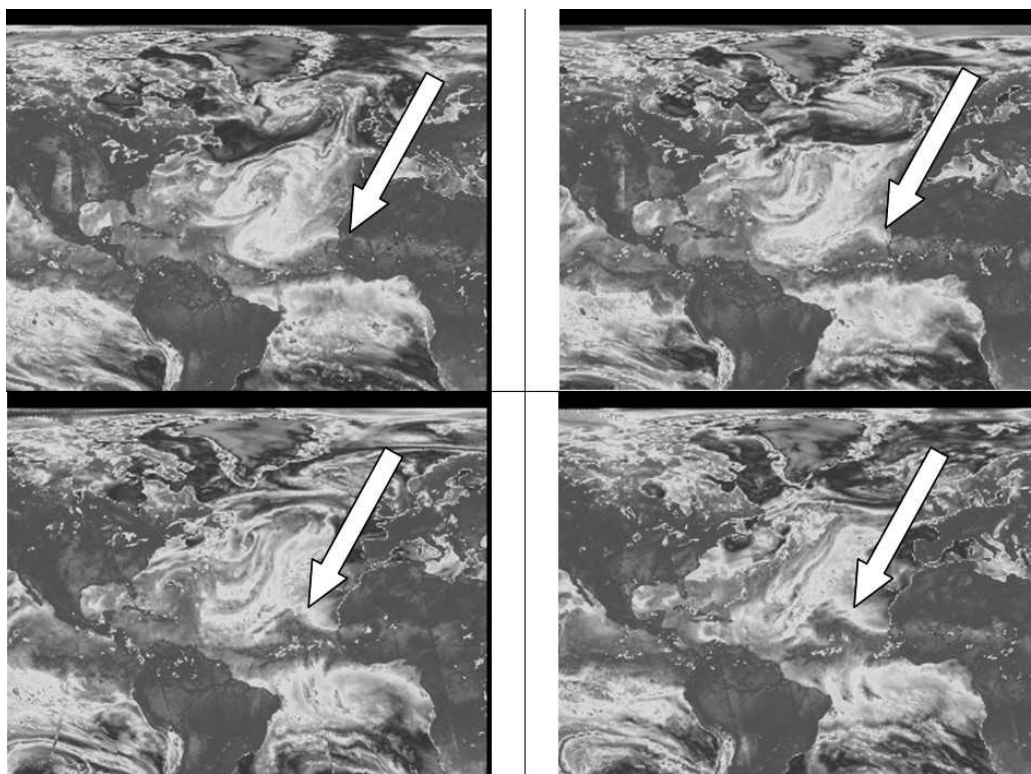


Рис. 2. Последовательные фрагменты глобального радиотеплового поля на частоте 85,5 ГГц по данным спутникового мониторинга от 3.08 (слева сверху), 4.08 (справа сверху), 5.08 (слева внизу) и 6.08 (справа внизу) 2005 г.

На рис. 2 приведены фрагменты глобального радиотеплового поля Земли на частоте 85,5 ГГц над акваторией северной Атлантики с координатами 90° с.ш. – 30° ю.ш., 120° з.д. – 30° в.д. в последовательные моменты времени – через сутки. Радиояркостная температура на частоте 85,5 ГГц характеризует общее содержание воды во всех видах, включая кристаллы льда в высоких слоях атмосферы. Фрагменты показаны в меркаторской проекции. Разные цвета отражают распределение радиояркостной температуры и согласуются с распределением влагозапаса тропосферы по широте и долготе. Каждая деталь радиотеплового

поля отражает структуру атмосферных движений и является отпечатком течений воздуха, переносящих вмороженный водяной пар. Повышенная радиояркая температура к северу от экватора демонстрирует расположение ВЗК. Стрелки указывают на возмущение и развивающийся из него циклон. Видно, что 3-го августа волнообразный изгиб находится над территорией Африки, 4-го августа развившийся из него вихрь находится уже над океаном, 5-го августа усилившийся вихрь переместился в западном направлении, 6-го августа можно видеть хорошо сформировавшийся тропический циклон. Параметры наблюдаемого течения (размеры и скорость продвижения на запад) согласуются с полученными в результате численного моделирования.

Заключение

На основе созданной авторами 3-мерной региональной модели циркуляции атмосферы изучается процесс формирования первичного циклонического вихря в тропических широтах нижней атмосферы, из которого в дальнейшем может развиваться мощный тропический ураган. Численное моделирование эволюции течения при разных изгибах ВЗК в начальный момент показало, что появление волнообразно искривленного участка ВЗК длиной ~800–1000 км в период активного тропического циклогенеза (июнь – октябрь) является предвестником образования одного или двух циклонических вихрей. В течение первых 30 час формируется циклонический вихрь с горизонтальными размерами 800 км и более и скоростью ветра более 20 м/с. В течение первых 40 час (к этому времени первый циклон отошел на запад примерно на 1000–1200 км), на месте первоначального изгиба ВЗК формируется второй циклонический вихрь с теми же размерами и скоростью ветра. Расстояние между центрами вихрей составляет ~1500 км. Таким образом, циклонические вихри, которые в дальнейшем могут усилиться до тропических циклонов, формируются в области ВЗК исключительно за счет развития гидродинамической неустойчивости крупномасштабного сдвигового течения. Для дальнейшего развития первичного циклонического вихря до стадии тропического шторма или урагана необходимо, чтобы он попал в область воздушных масс с высоким влагозапасом (скрытым теплом). Изгибы ВЗК и области повышенного влагозапаса тропосферы легко определяются спутниковым мониторингом и могут использоваться для раннего обнаружения первичных циклонических вихрей и возможной их эволюции.

Литература

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. (2006) Глобальное радиотепловое поле системы океан–атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исследование Земли из космоса, 2006, № 3. С. 64-69.
2. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. (2008) Межгодовые и сезонные изменения радиотеплового поля Земли по данным микроволнового спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса, 2008. № 5. С. 9-15.
3. Астафьева Н.М., Раев М.Д. (2009) Методика изучения радиотеплового поля Земли и распределения влагозапаса тропосферы // Исследование Земли из космоса, 2009. № 6. С. 16-23.
4. Астафьева Н.М., Раев М.Д. (2010) Влияние крупномасштабного удаленного атмосферного окружения на траектории тропических циклонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Том 7. № 1. С. 61-74.

5. Астафьева Н.М., Хайруллина Г.Р. (2010) Проявление некоторых климатических тенденций в структуре радиотеплового поля над Атлантикой // Исследование Земли из космоса, 2010. № 3. С. 41-48.
6. Белоцерковский О.М., Мингалева И.В., Мингалева В.С., Мингалева О.В., Опарин А.М. (2006) О механизме возникновения крупномасштабного вихря в тропосфере над неравномерно нагретой поверхностью // ДАН, 2006. Т. 410. № 6. С. 816-820.
7. Белоцерковский О.М., Мингалева И.В., Мингалева В.С., Мингалева О.В., Опарин А.М., Четкин В.М. (2009) Образование крупномасштабных вихрей в сдвиговых течениях в нижней атмосфере Земли в области тропических широт // Космические исследования, 2009. Т. 47. № 6. С. 501-514.
8. Мингалева В.С., Мингалева И.В., Мингалева О.В., Опарин А.М., Орлов К.Г. (2010а) Обобщение монотонной гибридной схемы второго порядка для уравнений газовой динамики на случай нерегулярной пространственной сетки // ЖВМ и МФ, 2010. Т. 50. № 5. С. 923-936.
9. Мингалева И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалева В.С., Мингалева О.В. (2010б) Механизм возникновения циклонических возмущений в области ВЗК и их раннее обнаружение // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т. 7. № 1. С. 112-125.
10. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., and Aikin A.C. (2002) NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res., 2002. V. 107, No. A12, P. 1468-1483.

Possibility of a detection of tropical cyclones and hurricanes formation according to satellite remote sensing

**I.V. Mingalev¹, N.M. Astafieva², K.G. Orlov¹, V.S. Mingalev¹, O.V. Mingalev¹,
V.M. Chechetkin³**

¹*Polar Geophysical Institute of RAS
184209, Murmansk region, Apatity, Academgorodok str., 26a
E-mail: mingalev_i@pgia.ru;*

²*Space Research Institute of RAS
117997, Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mail: ast@iki.rssi.ru;*

³*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
125047, Moscow, Miuskaya Sq., 4
E-mail: chechet@spp.keldysh.ru*

On the basis of numerical simulation of cyclonic vortices formation in the field of an intratropical zone of convergence (IZC), and also the analysis of the data of microwave remote sensing (global radio thermal fields of the Earth from electronic collection GLOBAL-Field) and the data about a wind in the field of an IZC the technique of the forecast of formation of tropical cyclones according to satellite remote sensing is offered. Work is executed with financial support of the RFBR № 10-01-00451.

Keywords: formation of tropical hurricanes, cyclonic vortices, numerical modeling.