

Влияние геометрии течения воздушных масс в области внутритропической зоны конвергенции на процесс формирования циклонических вихрей

И.В. Мингалев¹, Н.М. Астафьев², К.Г. Орлов¹, В.М. Чечеткин³, В.С. Мингалев¹,
О.В. Мингалев¹

¹Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН
184209, Мурманская обл., Анатиты, 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 пл., 4
E-mail: chechet@spp.keldysh.ru

Приведены результаты исследования при помощи численного моделирования влияние геометрии движения воздушных масс в районе внутритропической зоны конвергенции на процессы развития возмущений, в результате которых формируются циклонические вихри. Показано, что количество образующихся циклонических вихрей и траектории их движения зависят от геометрии движения воздушных масс и формы возмущений этого движения внутритропической зоны конвергенции. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-01-00451).

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

Введение

В этой работе с помощью численного моделирования исследуется влияние геометрии течения воздушных в тропосфере на тропических широтах на процессы образования первичных циклонических вихрей, из которых развиваются тропические циклоны и ураганы. На сегодняшний день в международном научном сообществе нет общепризнанного физически ясного механизма образования тропических циклонов и ураганов. Было предложено большое число гипотез, но ни одна из них не была полностью подтверждена данными наблюдений. Как показывают данные наблюдений, в течение года в тропосфере Земли образуется обычно от 20 до 40 тропических циклонов и ураганов. Причем подавляющее большинство из них образуется в период наиболее интенсивного циклогенеза с июня по октябрь. В мае и в ноябре образование тропических циклонов наблюдается намного реже. В другие месяцы года образование тропических циклонов наблюдается крайне редко. Также в период с июня по сентябрь наблюдается образование пыльных бурь над Сахарой, которые представляют собой циклонические вихри диаметром от 700 до 1500 км, причем скорость ветра в них достигает величины 15...20 м/с. Авторы провели анализ данных наблюдений, в частности радиотепловых полей Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field [<http://www.iki.rssi.ru>] (Астафьев и др., 2006, 2008, Астафьев, Раев, 2009, Астафьев, Хайруллина, 2010), позволяющих изучать структуру атмосферных движений в широком диапазоне пространственно–временных масштабов. Проведенный анализ показал, что в период интенсивного циклогенеза в районе внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) регулярно образуются циклонические вихри диаметром от 700 до 1500 км, в которых скорость ветра достигает 15...25 м/с. Большая часть из этих вихрей существует обычно в течение 3...4 сут, а затем затухает. Меньшая часть из этих вихрей развивается в тропические циклоны и ура-

ганы в течение 5...7 сут. Причем формирование тропического циклона из первичного вихря происходит только в том случае, когда этот вихрь находится внутри теплой и влажной воздушной массы либо на ее границе. Таким образом, процесс образования тропического циклона следует разделить на две части: образование первичного достаточно крупного циклонического вихря и разгон течения в этом вихре до стадии тропического циклона и, возможно, урагана.

Очень важна для понимания механизма образования первичных циклонических вихрей геометрическая структура течения воздушных масс в тропосфере над океанами в приэкваториальной области в период циклогенеза. В этой области находятся циркуляционные ячейки Хедли, между которыми располагается ВЗК. К северу и к югу от ВЗК ниже высоты 3 км меридиональная компонента ветра направлена к центру ВЗК, а зональная компонента ветра направлена с востока на запад и достигает максимальных значений 20...30 м/с в районе центра ВЗК. Внутри ВЗК и в ее окрестности нагретый воздух поднимается вверх. В период с июня по октябрь ВЗК над акваторией Атлантики смещается к северу от экватора на 5...15 градусов широты, заметно сужается. В этот период к северу от ВЗК в диапазоне высот от поверхности до примерно 3 км зональная компонента ветра направлена на запад, причем она быстро увеличивается при движении 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 дальнейшем движении 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, ширина которого в меридиональном направлении не более 200...300 км. Разница между значениями зональной компоненты ветра на северной и южной границах этого течения лежит обычно в пределах 25...35 м/с. В этот период часто возникают волнообразно искривленные участки ВЗК, имеющие длину от 800 до 1500 км и отклоняющиеся от остальной части ВЗК на север на 100...300 км и более. Причиной их появления может быть меридиональный градиент давления, возникающий из-за разных скоростей нагрева нижней тропосферы севернее и южнее ВЗК. После появления этих искривленных участков ВЗК развивается гидродинамическая неустойчивость сдвигового течения. Ее развитие приводит к образованию крупномасштабных горизонтальных вихрей и распаду первоначального течения. По мнению авторов данной работы в этом заключается механизм образования первичных циклонических вихрей.

В период с ноября по май ВЗК как правило находится вблизи экватора и имеет ширину в 3–4 раза больше, чем период активного циклогенеза. В этот период зональная компонента ветра к югу и к северу от центра ВЗК распределена примерно симметрично, и меридиональный градиент зональной компоненты ветра меньше на порядок или более чем в зональном сдвиговом течении на северной границе ВЗК в период активного циклогенеза. По этой причине не происходит формирование первичных циклонических вихрей диаметром 800...1500 км, из которых могли бы развиться тропические циклоны.

Данная работа является продолжением серии работ авторов (Мингалев и др., 2010б, 2011, 2012а), в которых изучаются процессы формирования первичных циклонических крупномасштабных вихрей в нижней тропосфере в районе ВЗК, из которых могут развиваться тропические циклоны и ураганы. В данной работе с помощью численного моделирования исследуется процесс формирования циклонических вихрей в результате развития неустойчивости и движение этих вихрей для двух конфигураций ВЗК в начальный момент. Эти конфигурации регулярно наблюдаются над Атлантическим океаном в период интенсивного циклогенеза.

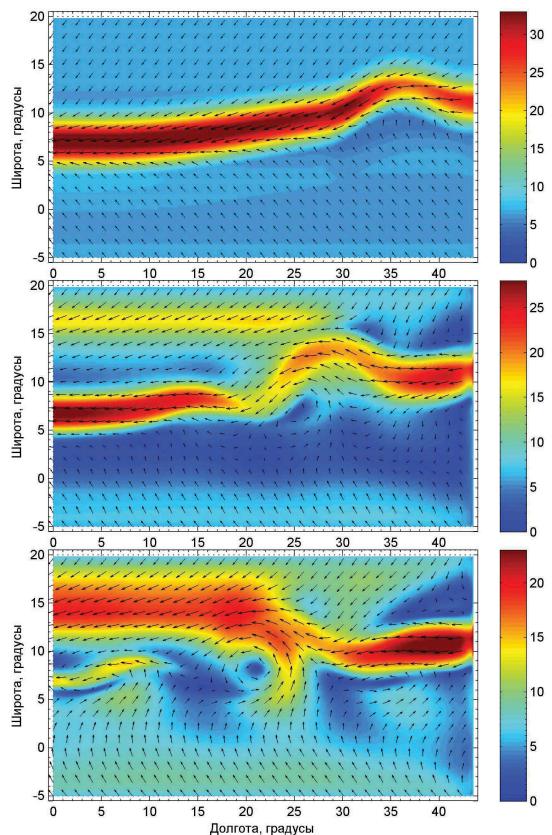


Рис. 1. Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра (м/с) на высоте 600 м в начальный момент (вверху) и в моменты времени через 20 ч (в центре) и через 40 ч (внизу) после начала моделирования; стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона — величину скорости ветра

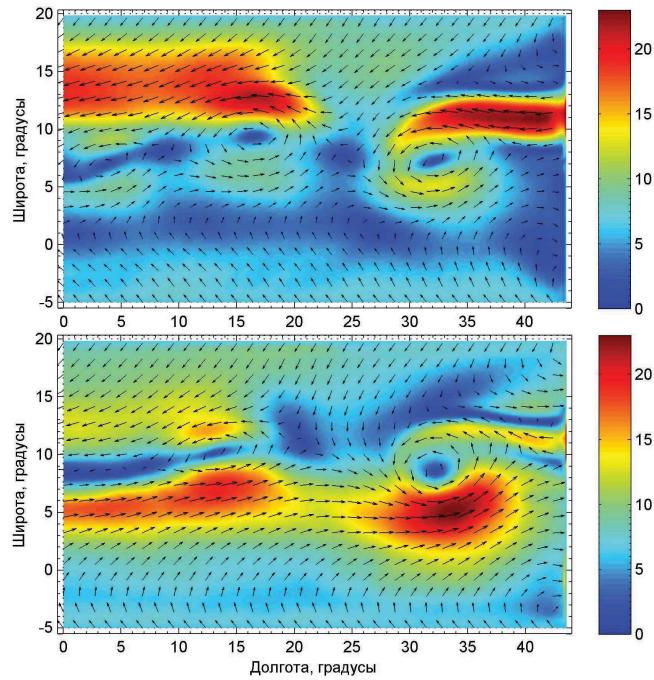


Рис. 2. Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра (м/с) на высоте 600 м в моменты времени через 60 ч (вверху) и через 80 ч (внизу) после начала моделирования; стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона — абсолютную величину скорости ветра

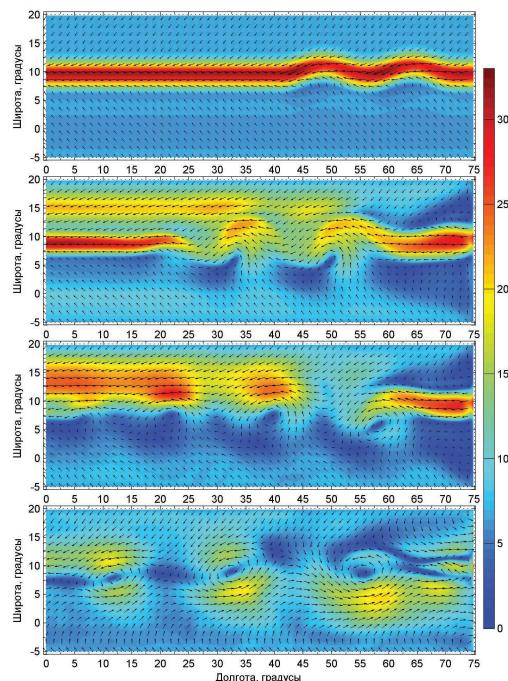


Рис. 3. Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра (м/с) на высоте 600 м в начальный момент (вверху) и в моменты времени через 30 ч (в центре), через 60 ч (в центре) и через 90 ч (внизу) после начала моделирования; стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона — величину скорости ветра

Описание модели, начальные и граничные условия

Для численного моделирования использована созданная авторами трехмерная региональная модель циркуляции атмосферы. Ее подробное описание содержится в работах (Белоцерковский и др., 2009; Мингалев и др., 2010а, 2011, 2012а, б), в которых использовались варианты этой модели с другими горизонтальными размерами области моделирования. В модели атмосферный газ рассматривается как смесь воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли из микрокапель воды и из микрочастиц льда, которые считаются сферами радиусов 0,1 и 0,03 мм, соответственно, движущимися относительно атмосферного газа со скоростями осаждения, определяемыми по формуле Стокса с поправкой Каннингэма. Выбранные размеры частиц аэрозолей соответствуют реальным средним размерам частиц в облаках. Температуры атмосферного газа и частиц аэрозолей считаются одинаковыми. Считается, 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 может присутствовать 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. В модели учитываются процессы нагрева-охлаждения воздуха за счет поглощения—испускания инфракрасного излучения. Система уравнений модели и метод ее численного решения детально описаны в работах (Белоцерковский и др., 2009; Мингалев и др., 2010а, б, 2012а, б). 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 трехмерного вектора объемной плотности импульса воздуха и уравнение для объемной плотности полной энергии, которая определяется с учетом скрытой теплоты фазовых переходов водяного пара. Область моделирования в настоящей работе является частью шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности и имеет размеры по высоте от поверхности Земли до высоты 15 км, по широте 25°, а по долготе размеры 44° или 75°. Южная граница области моделирования находилась на 5° юж. широты. Расчетная сетка выбрана равномерной с шагом по широте и долготе, равным 0,04°, 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 четвертой 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 полагается равной нулю, зональная компонента равной -5 м/с (направлена с востока на запад). На высотах ниже 3 км меридиональная компонента задана и направлена внутрь области моделирования, на высоте 3 км эта компонента равна нулю, выше 3 км задана равной нулю первая производная от этой компоненты в меридиональном направлении. Температура воздуха на этих 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 первой 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 увеличивается 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

Проведено численное моделирование эволюции течения при двух различных конфигурациях ВЗК в начальный момент. Первая конфигурация такова, что имеется участок ВЗК длиной около 2500 км, на котором она смещается на север при движении с запада на восток. На правом конце этого участка имеется дополнительно искривленный участок длиной около 1000 км отклоняющийся на север (рис. 1, вверху).

На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования этой конфигурации. Центральная линия ВЗК в начальный момент проходит по южной границе красной полосы на рис. 1 вверху. При переходе через эту линию горизонтальный ветер меняет направление и величину. Западнее долготы 30° виден дополнительный изогнутый участок этой линии. На рис. 1 в центре видно, что через 20 ч после начала моделирования происходит развитие начального возмущения, отклонение на север дополнительно изогнутого участка увеличивается, и формируется горизонтальный циклонический вихрь с центром, лежащим примерно на широте 7° и долготе $25,5^{\circ}$. На рис. 1 внизу видно, что через 40 ч после начала моделирования этот вихрь достиг размеров примерно 800 км в диаметре, а центр его переместился в точку на широте примерно 8° и долготе 21° (то есть переместился за 20 ч примерно на 450...500 км на запад и на 110 км на север). Также видно, что к этому моменту начинает формироваться второй циклонический вихрь с центром, лежащим примерно на широте 7° и долготе 35° . На рис. 2 вверху видно, что в момент через 60 часов после начала моделирования первый вихрь сохранил свои размеры, а его центр лежит на широте примерно $9,5^{\circ}$ и долготе 17° (переме-

стился еще на 400...450 км на запад и на 160 км на север). Второй вихрь к этому моменту достиг размеров примерно 800 км в диаметре, а его центр лежит примерно на широте 7° и долготе 32° (переместился примерно на 330 км на запад). Скорость ветра в обоих вихрях достигает значений 20 м/с и более. На рис. 2 внизу видно, что в момент через 80 ч после начала моделирования первый вихрь сохранил свои размеры, а его центр лежит на широте примерно $9,5^{\circ}$ и долготе 13° (переместился еще на 400...450 км на запад). Второй вихрь к этому моменту имеет примерно прежние размеры, а его центр лежит примерно на широте 9° и долготе 32° (переместился примерно на 220 км на север). Скорость ветра в обоих вихрях достигает значений 20 м/с и более. Таким образом, для первой конфигурации течения в разных местах и в разные моменты времени сформировались два циклонических вихря с горизонтальными размерами примерно 800 км. При этом первый вихрь сформировался примерно через 20 ч после начала моделирования и переместился за последующие 60 ч примерно на 1300...1400 км на запад и на 250...270 км на север от места образования. Второй вихрь сформировался примерно через 45 ч после начала моделирования и за последующие 35 ч переместился примерно на 300...350 км на запад и на 210...230 км на север от места образования, причем последние 20 ч второй вихрь перемещается исключительно на север.

Вторая конфигурация течения в начальный момент такова, что ВЗК расположена во всей области моделирования на одной широте за исключением участка длиной около 3300 км, на котором ВЗК синусоидально изгибаются, дважды смещаясь на север (рис. 3, вверху). На рис. 3 представлены результаты моделирования этой конфигурации. На рис. 3 на второй сверху панели видно, что к моменту времени 30 ч после начала моделирования произошло развитие начального возмущения, отклонение на север изогнутого участка увеличилось, и сформировались два горизонтальных циклонических вихря. Их центры лежат примерно на широте 7° и на долготах 33° и 50° . На рис. 3 на второй снизу панели видно, что к моменту времени 60 ч после начала моделирования первые два вихря переместились на запад, и, в дополнение к ним, сформировался третий вихрь. Все вихри имеют диаметры примерно 800 км. Центры первых двух вихрей лежат на широте примерно $7,5^{\circ}$ и на долготах 22 и 40° , т. е. эти вихри за 30 ч переместились примерно на 1000...1100 км на запад и на 50 км на север. Центр третьего вихря лежит примерно на широте 6° и долготе 58° . На рис. 3 внизу видно, что к моменту времени через 90 ч после начала моделирования все вихри увеличили свои размеры по сравнению с моментом 60 ч после начала моделирования. Центр первого вихря лежит на широте примерно $7,5^{\circ}$ и долготе 12° . Он переместился за 30 ч на 1000...1100 км на запад.

Центр второго вихря лежит примерно на широте 9° и долготе $32,5^{\circ}$. Он переместился за 30 ч на 800...850 км на запад и на 150...170 км на север. Центр третьего вихря лежит примерно на широте 9° и долготе 56° . Он переместился за 30 ч на 200...220 км на запад и на 300...350 км на север. Таким образом, для второй конфигурации течения практически одновременно на одной широте, но при разных долготах формируются сначала первые два вихря, а затем к западу от них формируется третий вихрь. Первые два вихря движутся в основном на запад, причем самый западный вихрь движется незначительно быстрее второго. Третий вихрь движется на северо-запад в 3–4 раза медленнее, чем первые два на запад.

Заключение

Представленные в данной работе результаты численного моделирования позволяют сделать следующие выводы. Первый вывод состоит в том, что в период интенсивного циклоногенеза, когда ВЗК над Атлантикой находится севернее экватора, и в ней имеется течение с горизонтальным сдвигом ветра, появление возмущений в виде искривленных участков ВЗК длиной 800 км и более запускает процесс развития гидродинамической неустойчивости, приводящий к образованию двух или трех циклонических вихрей диаметром 800...1000 км,

в течение 1,5...2,5 сут. После образования эти вихри движутся на запад или северо-запад. При этом эти вихри образуются на месте участка ВЗК длиной в несколько тысяч километров, а скорость ветра в них может достигать значений 20...25 м/с. Второй вывод состоит в том, что геометрическая конфигурация течения воздушных масс в районе ВЗК и форма возмущения существенно влияют на количество образовавшихся циклонических вихрей и на траекторию их движения после возникновения. Вихри могут двигаться на запад, на северо-запад. Третий вывод состоит в том, что регистрируя по данным спутникового мониторинга появления искривленных участков ВЗК длиной 700 км и более, можно предсказать количество образующихся циклонических вихрей, которые могут со временем превратиться в тропические циклоны. Также можно предсказать районы образования этих вихрей и направление их движения в течение первых суток после образования.

Литература

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Глобальное радиотепловое поле системы океан–атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исследования Земли из космоса. 2006. № 3. С. 64–69.
2. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Междугодовые и сезонные изменения радиотеплового поля Земли по данным микроволнового спутникового мониторинга // Исследования Земли из космоса. 2008. № 5. С. 9–15.
3. Астафьева Н.М., Шарков Е.А. Траектория и эволюция урагана ALBERTO от тропических до средних и средневысоких широт: спутниковая микроволновая радиометрия // Исследования Земли из космоса. 2008. № 6. С. 60–66.
4. Астафьева Н.М., Раев М.Д. Методика изучения радиотеплового поля Земли и распределения влагозапаса тропосферы // Исследования Земли из космоса. 2009. № 6. С. 16–23.
5. Астафьева Н.М., Хайруллина Г.Р. Проявление некоторых климатических тенденций в структуре радиотеплового поля над Атлантикой // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 41–48.
6. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан – атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 168 с.
7. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Опарин А.М., Чечеткин В.М. Образование крупномасштабных вихрей в сдвиговых течениях в нижней атмосфере Земли в области тропических широт // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 6. С. 501–514.
8. Мингалев В.С., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Опарин А.М., Орлов К.Г. (2010а) Обобщение монотонной гибридной схемы второго порядка для уравнений газовой динамики на случай нерегулярной пространственной сетки // Журн. вычислительной математики и математической физики. 2010. Т. 50. № 5. С. 923–936.
9. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев 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. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Чечеткин В.М. Возможность предсказания образования тропических циклонов и ураганов по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 290–296.
11. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Чечеткин В.М. (2012а) Численное моделирование формирования циклонических вихревых течений в области внутритечевых зон конвергенции и их раннее обнаружение // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 3. С. 242–257.
12. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. (2012б) Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 2. С. 166–175.
13. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. N. A12. P. 1468–1483.

Influence of a geometry of air mass flow in the region of an intratropical zone of convergence on process of formation of cyclone vortices

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

*¹ Polar Geophysical Institute of RAS
184209, Murmansk region, Apatity, Academgorodok, 26a*

E-mail: mingalev_i@pgia.ru

*² Space Research Institute (IKI RAN)
117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32*

E-mail: ast@iki.rssi.ru

*³ Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
125047, Moscow, Miusskaya Sq., 4*

E-mail: chechet@spp.keldysh.ru

The influence of configuration of air mass streams in the region of intratropical zone of convergence on developments of perturbations which lead to formation of cyclone vortices is investigated by means of numerical modelling. It is shown that quantity of formed cyclonic vortexes and a trajectory of their motion depend on configuration of air mass streams and the shape of perturbations of these streams in the region of intratropical zone of convergence. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 10-01-00451).

Keywords: numerical modeling, cyclone vortices, formation of tropical cyclones.