

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.202-206

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев, Е.А. Федотова

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия
e-mails: mingalev_i@pgi.ru; orlov@pgia.ru; godograf87@mail.ru

Аннотация. В данной работе изложено краткое описание модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, предназначенной для изучения динамики атмосферы в широком диапазоне пространственно-временных масштабов и основанной на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с высоким разрешением.

Введение

В атмосфере Земли протекают протекают играющие важную роль физические процессы, для корректного численного моделирования которых необходимо использовать модель общей циркуляции, основанную на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с горизонтальным разрешением не хуже 50 км. Примером таких процессов являются регулярно возникающие в нижней атмосфере Земли горизонтальные сдвиговые течения протяженностью более 1500 км, в которых характерные пространственные масштабы изменения гидродинамической скорости не превышают 100 км. Такие течения возникают, в частности, между ячейками циркуляции Хедли, Ферреля и приполюсными ячейками, а также на границах циклонов и антициклонов. Эти сдвиговые течения могут существовать в течение нескольких суток и периодически изгибаться, сжиматься и расширяться. При достаточно сильном поперечном сжатии этих течений на их изгибах развивается гидродинамическая неустойчивость, приводящая к распаду течения с образованием крупномасштабных вихрей. При образовании этих вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции над океанами из них могут развиваться тропические циклоны. При образовании этих вихрей в районе арктических фронтов из них могут развиваться полярные циклоны. При образовании этих вихрей на границах крупных циклонов и антициклонов из них могут развиваться мезомасштабные циклоны. При образовании этих вихрей над пустынями возникают песчаные бури.

Процессы образования и эволюции вышеуказанных атмосферных вихревых течений играют в динамике атмосферы существенную роль и не могут быть правильно описаны в рамках системы уравнений геофизической гидродинамики. Для физически корректного описания таких динамических процессов и предназначена представленная в данной работе модель. В модели учитываются рельеф земной поверхности и наличие в атмосфере аэрозолей в виде микрокапель воды и ледяных микрочастиц, а также фазовые переходы водяного пара в аэрозольные частицы и обратно. В модели предусмотрена вставка области со сверхвысоким разрешением, в которой шаг сетки по горизонтальным направлениям в 4, в 8 или в 16 раз меньше, чем в остальной области моделирования. Важная особенность нашей модели состоит в том, что ее динамическое ядро полностью работает на графических процессорах и использует массивно параллельные вычисления. Это позволяет проводить расчеты на современном персональном компьютере с двумя или более графическими ускорителями последнего поколения.

Область моделирования, расчетная сетка, система уравнений

Область моделирования простирается от поверхности Земли до сферы, центр которой совпадает с центром Земли, а радиус которой на 75 км превосходит средний радиус Земли на экваторе. В модели учитывается несферичность земной поверхности и несферичность гравитационного поля Земли, а также используется расчетная сетка, равномерная в сферических географических координатах. Ближайшие к полюсам целые узлы сетки удалены от полюсов по широте на половину шага. В нынешнем варианте сетка имеет 768 узлов по долготе и 384 узла по широте (шаг 0.46875°). Шаг сетки по высоте равен 200 м. Нижняя граница области моделирования является поверхностью, составленной из плоских треугольников, вершины которых находятся в узлах сетки. Эта поверхность аппроксимирует рельеф поверхности Земли. Шаг сетки по долготе и широте может быть уменьшен. В модели предусмотрена вставка области, в которой шаг сетки по горизонтальным направлениям в 4 или в 8 раз меньше, чем в остальной области моделирования. В текущем

варианте модели горизонтальные размеры этой области со сверхвысоким разрешением составляют 384 узла по долготе и 192 узла по широте.

В модели атмосферный газ рассматривается как смесь сухого воздуха, который считается смесью газов постоянного состава, и водяного пара, содержание которого может изменяться. В атмосферном газе могут присутствовать аэрозоли двух видов: первый состоит из микрокапель воды, а второй - из микрочастиц льда. В действующем варианте модели принято упрощающее предположение, что микрокапли воды и микрочастицы льда являются сферами радиусов $r_{\text{вод}} = 0.1$ мкм и $r_{\text{л}} = 0.03$ мкм соответственно. Эти размеры соответствуют реальным средним размерам частиц в облаках. Скорости осаждения аэрозольных частиц относительно атмосферного газа $v_{\text{вод}}^{oc}$ и $v_{\text{л}}^{oc}$ определяются по формуле Стокса с поправкой Каннингема. Температуры атмосферного газа и частиц аэрозолей считаются одинаковыми. Считается, что аэрозоль из капель воды может присутствовать только при условии насыщенности водяного пара и температуре атмосферного газа не ниже $T_0 = 273.15$ К, а аэрозоль из частиц льда может присутствовать только при условии насыщенности водяного пара и температуре атмосферного газа не выше T_0 . При температуре атмосферного газа $T = T_0$ эта температура не может увеличиться, пока не расплавятся все частицы льда, и не может уменьшиться, пока не замерзнут все капли воды. Зависимость плотности насыщенного пара ρ_n^{max} от температуры T задана аналитически по формулам, которые приведены в [1–8] и хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью.

В модели в каждом узле расчетной сетки вычисляются следующие переменные: T - температура, $\rho_{\text{возд}}$ и ρ_n - соответственно плотности воздуха и водяного пара, а также v - гидродинамическая скорость смеси, $\rho_{\text{вод}}$ и ρ_l - общая масса в единице объема соответственно водяных капель и микрочастиц льда. В систему уравнений модели входят: уравнение неразрывности для воздуха и уравнение неразрывности для полного содержания воды во всех фазовых состояниях, уравнение для объемной плотности импульса смеси воздуха и водяного пара, уравнения для объемной плотности импульса водяных капель и микрочастиц льда, а также уравнение для суммы внутренней и кинетической энергии единицы объема среды. Эта система уравнений и метод ее численного интегрирования изложены в работе [9].

В этом методе последний переход по времени осуществляется в два этапа. На первом этапе с помощью противопотоковой гибридной схемы, описанной в работе [10], рассчитываются потоки через грани контрольных объемов узлов сетки массы воздуха и массы водяного пара, потоки импульса смеси воздуха и водяного пара и потоки суммы внутренней и кинетической энергии этой смеси, а также потоки массы микрочастиц из воды и льда, потоки их импульса и потоки их сумм внутренней и кинетической энергии в предположении, что нет фазовых переходов воды между паром и аэрозольными частицами. Затем в контрольных объемах узлов сетки на новом временном слое вычисляются масса воздуха и масса воды во всех фазовых состояниях, а также импульс и сумма внутренней и кинетической энергии воздуха, пара и частиц аэрозолей. На втором этапе в контрольных объемах узлов сетки вычисляются сначала кинетическая энергия, а затем внутренняя энергия. После этого при помощи уравнения (6) определяются температура и распределение воды между фазовыми состояниями, то есть на этом этапе учитываются фазовые переходы воды.

При проведении тестовых расчетов для задания мощности нагрева–охлаждения атмосферного газа в единице объема за счет поглощения–испускания электромагнитного излучения в модели использовалось релаксационное приближение, которое заключается в том, что указанная мощность считается прямо пропорциональной отклонению температуры атмосферного газа от специально подобранной релаксационной температуры $T_{\text{рел}}$. Эта мощность вычисляется по формуле

$$Q(t, h, \varphi, \beta) = \frac{3}{2} \rho R_{\text{атм}} (T_{\text{рел}}(t, h, \varphi, \beta) - T(t, h, \varphi, \beta)) / \tau_{\text{рел}}(h),$$

где t, h, φ, β – время, высота, долгота и широта соответственно, $\tau_{\text{рел}}(h)$ — зависящее только от высоты время релаксации. Релаксационная температура $T_{\text{рел}}(t, h, \varphi, \beta)$ зависит от времени, высоты, долготы и широты. Она вместе с временем релаксации подбирается так, чтобы максимально приблизить значения мощности нагрева/охлаждения в единице объема Q к имеющимся экспериментальным данным и воспроизвести основные качественные закономерности в зависимости Q от времени, высоты, долготы и широты.

Начальные и граничные условия

В модели использовались следующие граничные условия. На нижней границе области моделирования было задано условие прилипания, то есть полагалась равной нулю гидродинамическая скорость на поверхности Земли. Также на нижней границе была задана нулем вертикальная компонента вектора потока тепла. На верхней границе области моделирования были заданы условие непротекания через границу (то есть была задана равной нулю вертикальная компонента гидродинамической скорости), условие проскальзывания (то есть были заданы равными нулю производные по высоте от горизонтальных компонент гидродинамической скорости), а также была задана равной нулю производная по высоте от вертикальной компоненты вектора потока тепла.

Распределение температуры атмосферного газа и распределение плотности атмосферного газа на поверхности Земли в начальный момент задавались по эмпирической модели NRLMSISE-00 [11] для соответствующей даты и гелиогеофизических условий. Зависимость плотности водяного пара от высоты в начальный момент определялась из условия, что влажность воздуха составляет 80% на поверхности и плавно убывает с высотой до значения 1% на высоте 20 км. Выше 20 км объемная доля водяного пара определялась по стандартной модели атмосферы. Зависимость плотности воздуха от высоты при фиксированной широте и долготе в начальный момент рассчитывалась из условия гидростатического равновесия по вертикали. В начальный момент времени долгота подсолнечной точки равнялась 180° . Все три компоненты скорости ветра в начальный момент брались равными нулю.

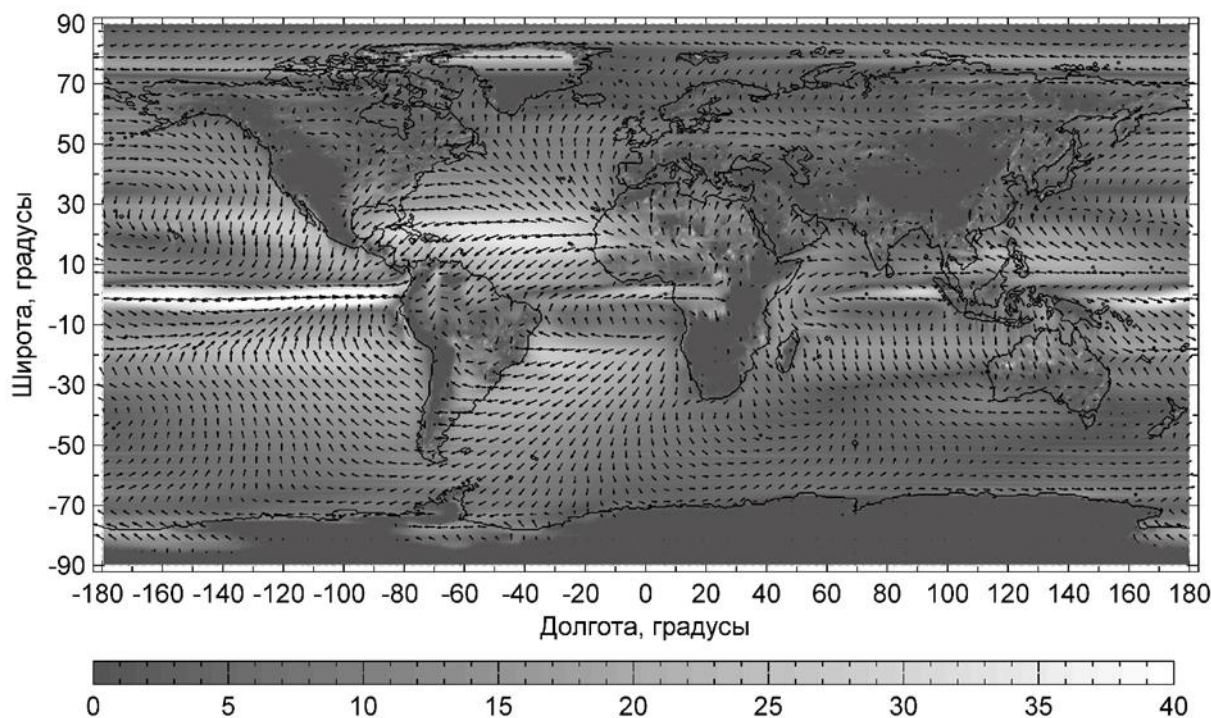


Рисунок 1. Распределение горизонтальной компоненты ветра (м/с) на высоте 800 м, полученное при использовании модельного нагрева атмосферы излучением для условий середины лета.

Некоторые результаты моделирования

Были проведены различные тестовые расчеты, которые показали, что в модели правильно реализован метод численного интегрирования системы уравнений, и что модель дает физически корректные результаты. Было проведено моделирование общей циркуляции атмосферы Земли при радиационном нагреве атмосферы, заданном по формуле (8), для двух случаев. В первом случае релаксационная температура и вертикальный профиль времени релаксации подбирались так, чтобы смоделировать нагрев атмосферы излучением в середине лета, а во втором — так, чтобы смоделировать этот нагрев в середине зимы.

Установление циркуляции проводилось следующим образом. Широта подсолнечной точки считалась постоянной, и осуществлялось ее суточное вращение по поверхности Земли. В результате примерно через 20–25 суток физического времени устанавливался почти периодический режим циркуляции атмосферы. Одной из особенностей этого режима является существование в нижней тропосфере протяженных областей, в которых имеется горизонтальный сдвиг горизонтальной компоненты ветра. Протяженность этих течений с горизонтальным сдвигом ветра составляет от 1500 до 5000–7000 км, а ширина их составляет от 150 до 400 км. Некоторые из этих течений периодически возникают и распадаются, а некоторые двигаются в горизонтальных направлениях, периодически сжимаются и расширяются, а также изгибаются. Когда эти сдвиговые течения достаточно узкие, и когда в них имеется достаточно большой сдвиг горизонтального ветра, то на их изгибах развивается гидродинамическая неустойчивость, приводящая к распаду течения с образованием от одного до трех крупномасштабных вихрей.

На рис. 1 приведено распределение горизонтальной компоненты ветра на высоте 800 м над уровнем моря, полученное при использовании модельного нагрева атмосферы излучением для условий середины лета. На рис. 2 приведен увеличенный фрагмент рис. 1 над центральной частью Атлантического океана. На этих рисунках стрелки указывают направление горизонтальной составляющей ветра, а их длина и цвет фона указывают ее абсолютную величину. Сплошные линии указывают границы материков.

Из рис. 1 видно, что над Атлантическим и Тихим океанами в районе экватора имеется горизонтальный сдвиг горизонтальной компоненты ветра. На рис. 2 центральная линия указанного сдвигового течения проходит через середину темной полосы, идущей в районе экватора от побережья Африки на запад, причем при переходе через эту полосу горизонтальный ветер меняет свое направление на противоположное. Видно, что указанное сдвиговое течение над Атлантическим океаном имеет протяженность около 3000 км и ширину порядка 150 км, а также видно, что это течение имеет слабые изгибы, и в нем формируются очаги циклонической циркуляции.

Результаты моделирования показали, что при использовании предложенного в данной работе упрощенного способа расчета нагрева атмосферы излучением модель позволяет получить общую циркуляцию атмосферы Земли, в которой имеется внутритропическая зона конвергенции с характерным для этой зоны сдвиговым течением на границе ячеек циркуляции Хедли, а также воспроизводит колебания и изгибы этого течения, которые регулярно наблюдаются на практике. Если сдвиговое течение в ВЗК является достаточно узким, и в нем имеется достаточно большой градиент горизонтального ветра, то изгибы этого течения вызывают развитие неустойчивости, в результате которой на месте ВЗК образуются крупномасштабные циклонические вихри.

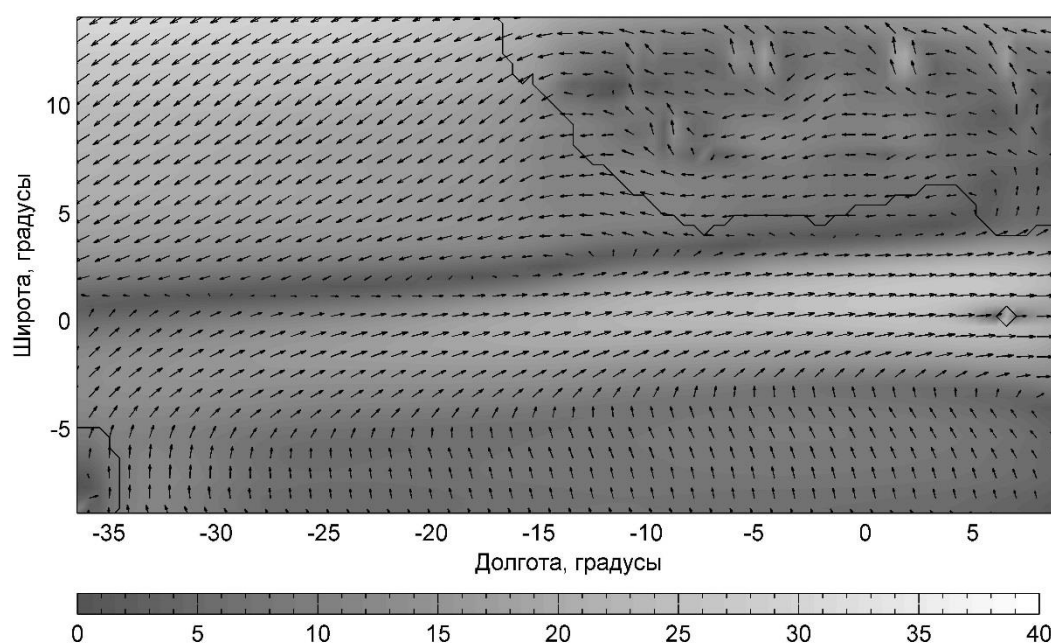


Рисунок 2. Увеличенный фрагмент рис. 1 над центральной частью Атлантического океана.

Заключение

В данной работе представлена новая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с высоким разрешением. В модели учитываются рельеф земной поверхности и наличие в атмосфере аэрозолей из воды и льда, а также фазовые переходы водяного пара в аэрозольные частицы и обратно. Созданная авторами программная реализация модели использует массивные параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях. Модель позволяет на новом уровне исследовать динамические процессы в нижней и средней атмосфере Земли, в том числе те процессы, которые ранее были недоступны для численного моделирования. В частности, позволяет моделировать процессы возникновения, движения и эволюции крупномасштабных вихрей в земной атмосфере.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-03022 мк.

Литература

1. Белоцерковский О.М., И.В. Мингалев, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев, А.М. Опарин, В.М. Четкин. Образование крупномасштабных вихрей в сдвиговых течениях в нижней атмосфере Земли в области тропических широт // *Космические исследования*, 2009, Т. 47, № 6, С. 501–514.
2. Мингалев И.В., К.Г. Орлов, В.С. Мингалев. Механизм образования полярных циклонов и возможность их

- прогноза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, Т. 8, № 1, С. 255–262.
3. Мингалев И.В., Н.М. Астафьева, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев, В.М. Чететкин. 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.
 4. Мингалев И.В., К.Г. Орлов, В.С. Мингалев. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений. // Космические исследования, 2012, Т. 50, № 2, С. 166–175.
 5. Мингалев И.В., Н.М. Астафьева, К.Г. Орлов, В.М. Чететкин, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев. Численное моделирование формирования циклонических вихревых течений в области внутритропической зоны конвергенции и их раннее обнаружение // Космические исследования, 2012, Т. 50, № 3, С. 242–257.
 6. Mingalev I.V., N.M. Astafieva, K.G. Orlov, V.S. Mingalev, O.V. Mingalev, V.M. Chechetkin. A simulation study of the formation of large-scale cyclonic and anticyclonic vortices in the vicinity of the intertropical convergence zone // ISRN Geophysics, 2013, Volume 2013, Article ID 215362, 12 pages.
 7. Mingalev I., K. Orlov, V. Mingalev. A Modeling Study of the Initial Formation of Polar Lows in the Vicinity of the Arctic Front // Advances in Meteorology, 2014, Vol. 2014, Article ID 970547, 10 pages.
 8. Mingalev I.V., N.M. Astafieva, K.G. Orlov, V.S. Mingalev, O.V. Mingalev, V.M. Chechetkin. Numerical modeling of the initial formation of cyclonic vortices at tropical latitudes // Atmospheric and Climate Sciences, 2014, Vol. 4, PP. 899–906.
 9. Четверушкин Б.Н., И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, В.М. Чететкин, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев. Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2017, Т. 29, № 8, С. 59–73.
 10. Мингалев В.С., И.В. Мингалев, О.В. Мингалев, А.М. Опарин, К.Г. Орлов. 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.
 11. Picone J.M., A.E. Hedin, D.P. Drob, and A.C. Aikin. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res., 2002, V. 107, No. A12, P. 1468–1483.