

УДК 551.513:551.515.2

К. Г. Орлов, И. В. Мингалев, В. С. Мингалев, В. М. Четкин, О. В. Мингалев

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗИМЫ И ЛЕТА

Аннотация

Представлены результаты моделирования общей циркуляции атмосферы Земли для условий зимы и лета. Созданная авторами модель основана на численном решении полной системы уравнений газовой динамики на трехмерной пространственной сетке с разрешением по горизонту 0.47 градуса. В этой модели учитываются несферичность поверхности Земли и ее рельеф, а также отличие поля тяготения Земли от сферически симметричного поля. В представленной версии модели используется упрощенный способ расчета скорости нагрева-охлаждения атмосферы за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения (так называемое релаксационное приближение). Главное внимание уделяется процессам формирования и эволюции крупномасштабных сдвиговых течений в нижней тропосфере, а также процессам развития возмущений в этих течениях, которые приводят к разрушению сдвиговых течений и формированию крупномасштабных циклонических вихрей.

Ключевые слова:

Полярный геофизический институт, циркуляция атмосферы, циклонические вихри, математическое моделирование.

K. G. Orlov, I. V. Mingalev, V. S. Mingalev, V. M. Chechetkin, O. V. Mingalev

NUMERICAL MODELING OF THE GLOBAL EARTH'S ATMOSPHERIC CIRCULATION FOR THE WINTER AND SUMMER CONDITIONS

Abstract

The results of modeling the global circulation of the Earth's atmosphere for the winter and summer conditions are presented. The model, developed by authors, is based on the numerical solution of the complete system of gas dynamics equations in a layer surrounding the Earth globally, with the latitude and longitude steps being equal to 0.47°, and height step being equal to 200 m. The non-sphericity of the Earth and its relief are taken into account in this model. A simplified method of calculation of the rate of heating-cooling air through the absorption-emission of electromagnetic radiation is used in this model. The focus is on the processes of formation and evolution of large-scale shear flows in the lower troposphere, and the processes of development of disturbances in such currents, which lead to the destruction of shear flow and the formation of large-scale cyclonic eddies.

Keywords:

Polar Geophysical Institute, atmospheric circulation, cyclonic vortices, mathematical modeling.

Описание модели

Данная модель построена с учетом фазовых переходов водяного пара в микрокаплях воды и частиц льда и с учетом оседания этих капель и частиц льда в поле силы тяжести. Описание подобной модели для ограниченного участка земной поверхности подробно изложено в работе [1].

Область моделирования простирается от поверхности до высоты 95 км на полюсах и до 75 км – на экваторе. В этой модели используется регулярная пространственная сетка в сферических координатах. Шаги сетки составляют 0.47° по горизонту и 200 м – по высоте. На полюсах узлов сетки нет.

Ближайшие к полюсам узлы сетки отстоят от них по широте на половину шага. Сетка имеет 768 узлов по долготе и 384 узла по широте.

Для численного решения системы уравнений использовалась явная разностная схема, детально описанная в работе [2] и хорошо себя зарекомендовавшая при расчетах динамики сложных трехмерных течений сжимаемого газа.

Начальные и граничные условия

Содержание водяных капель и микрочастиц льда в воздухе в начальный момент задавалось равным нулю во всей области моделирования. Начальная температура задавалась по эмпирической модели NRLMSISE-00. Начальная плотность водяного пара в узлах сетки задавалась равной 60 % от плотности насыщенного водяного пара при температуре в данном узле сетки. Значения начальной плотности воздуха на поверхности определялись по эмпирической модели NRLMSISE-00. Зависимость начальной плотности воздуха от высоты определялась из условия гидростатического равновесия. Скорость ветра в начальный момент полагалась равной нулю.

На верхней и нижней границах области моделирования задавалось условие непротекания и Релеевское трение. Сила трения вычислялась по формуле:

$$F_{\text{тр}} = -\rho v_{\text{гор}} \cdot K_{\text{тр}},$$

где $v_{\text{гор}}$ – вектор горизонтальной скорости; ρ – плотность; $K_{\text{тр}}$ – коэффициент поверхностного трения.

Упрощенное описание радиационного нагрева атмосферы

Используемый в модели упрощенный способ расчета нагрева/охлаждения атмосферы за счет поглощения/испускания электромагнитного излучения (так называемое релаксационное приближение) заключается в том, что мощность нагрева/охлаждения атмосферного газа в единице объема за счет поглощения/испускания электромагнитного излучения считается прямо пропорциональной отклонению температуры атмосферного газа от специально подобранной релаксационной температуры $T_{\text{рел}}$. Эта мощность вычисляется по формуле:

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

где t, h, ϕ, β – время, высота, долгота, широта соответственно; $\tau_{\text{рел}}(h)$ – зависящее только от высоты время релаксации. Релаксационная температура $T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta)$ вместе со временем релаксации подбирается так, чтобы максимально приблизить значения мощности нагрева/охлаждения в единице объема Q к имеющимся экспериментальным данным.

Один из способов задания релаксационной температуры следующий:

$$T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta) = T_{\text{ср}}(h) + T_{\text{нопр}}(h) \cdot (\max\{\cos\theta, 0\} - 0.25) \quad (1)$$

В этой формуле $T_{\text{ср}}(h)$ – средняя температура на высоте h , заданная по модели NRLMSIS-00, θ – зенитный угол солнца в точке с долготой ϕ и широтой β в текущий момент времени. Второе слагаемое правой части формулы (1) задает нагрев на освещенной стороне и выхолаживание на ночной стороне, причем $T_{\text{нопр}}(h)$ – поправочная температура, которая подбирается так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие результатов моделирования данным наблюдений. В данной работе $T_{\text{нопр}}(h)$ бралась равной 60 К для всех высот.

Другой способ задания релаксационной температуры имеет вид:

$$T_{\text{рел}}(t, h, \phi, \beta) = T_{\text{msis}}(t, h, \phi, \beta), \quad (2)$$

где $T_{\text{msis}}(t, h, \phi, \beta)$ – температура, заданная по модели NRLMSIS-00 для рассматриваемой даты.

Результаты моделирования

Авторами было проведено моделирование процесса установления общей циркуляции атмосферы Земли для дат 16 января и 16 июля. Релаксационная температура задавалась по формуле (2).

Для даты 16 января через 4900 ч физического времени качественная картина циркуляции имеет следующие особенности. На рис.1 изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. В тропических широтах обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к экватору и на запад, образуя пассаты. Таким образом, в районе экватора образуется область, где имеет место сдвиговое течение. Такая область называется внутритропической зоной конвергенции. В области умеренных широт обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к полюсам и на восток, а в полярных областях обоих полушарий – преимущественно к экватору и на запад. Около 65 ° широты в северном и южном полушариях образуется сдвиговое течение, называемое арктическим фронтом. С некоторой периодичностью арктический фронт разрушается, а затем появляется снова, что хорошо согласуется с наблюдениями. Таким образом, на высоте 1 км можно наблюдать наличие трех ячеек циркуляции в северном полушарии (приполюсная ячейка, ячейка Ферреля и ячейка Хэдли) и трех ячеек циркуляции в южном полушарии.

На рисунке 2 крупным планом изображен участок области моделирования от 16 ° южной широты до 16 ° северной широты и от 40 до 130 ° по долготе. На этом рисунке изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. Около 3 ° широты в северном полушарии можно наблюдать внутритропическую зону конвергенции.

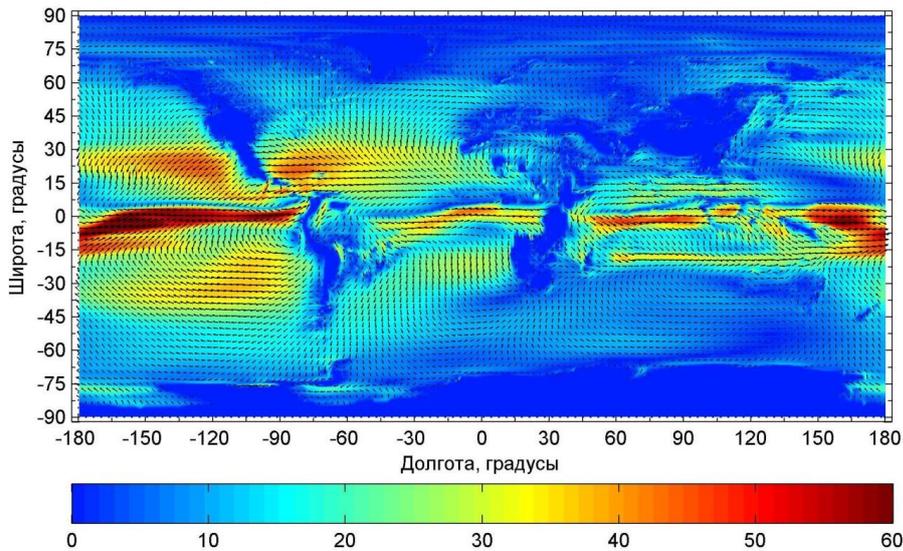


Рис.1. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 4900 ч после начала моделирования

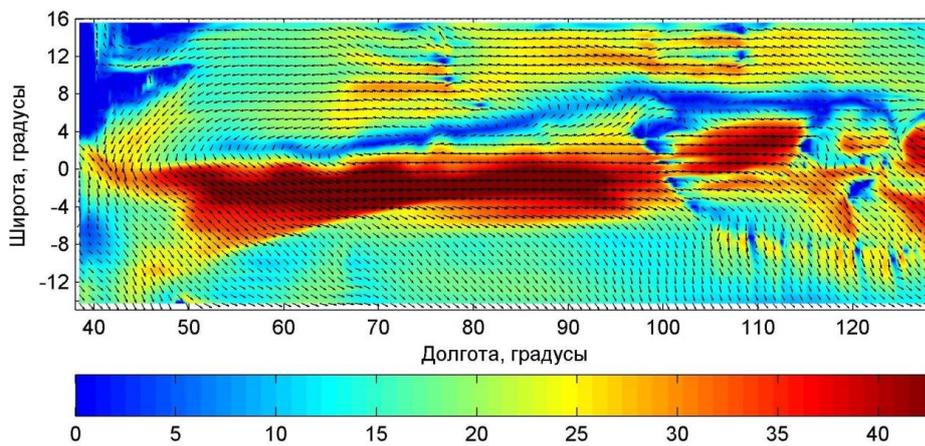


Рис.2. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 4900 ч после начала моделирования (локальная область)

Для даты 16 июля через 2130 ч физического времени качественная картина циркуляции имеет следующие особенности. На рис.3 изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. В районе экватора образуется область, где имеет место сдвиговое течение. Скорость ветра здесь местами достигает 65 м/с. В области умеренных широт обоих полушарий горизонтальный ветер направлен преимущественно к полюсам и на восток, а в полярных областях обоих полушарий – преимущественно к экватору и на запад. Около 75 ° широты в северном полушарии образуется сдвиговое течение, называемое арктическим фронтом, который также как и в зимнее время с некоторой периодичностью разрушается и появляется снова. Таким образом, на высоте 1 км в летнее время также можно наблюдать наличие трех ячеек циркуляции в северном полушарии (приполюсная ячейка, ячейка Ферреля и ячейка Хэдли) и трех ячеек циркуляции в южном полушарии.

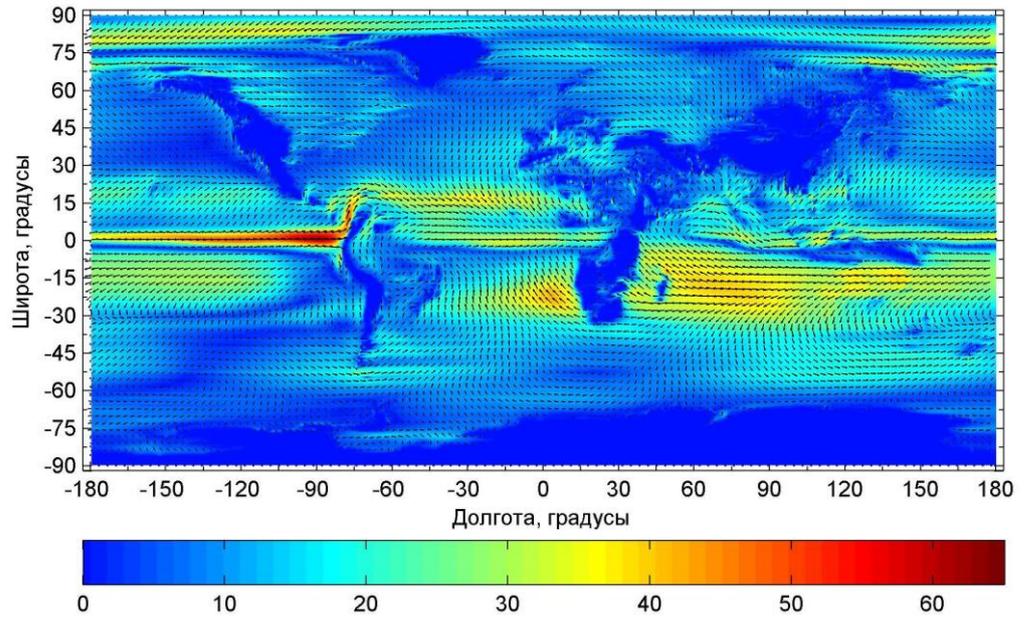


Рис.3. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 2130 ч после начала моделирования

На рисунке 4 крупным планом изображен участок области моделирования от 16° южной широты до 16° северной широты и от 40° до 130° по долготы. На этом рисунке изображен горизонтальный ветер на высоте 1 км. Около 3° широты в южном полушарии можно наблюдать внутритропическую зону конвергенции. А при 2° южной широты и 74° долготы наблюдается изгиб внутритропической зоны конвергенции, что может стать причиной зарождения тропического циклона [3].

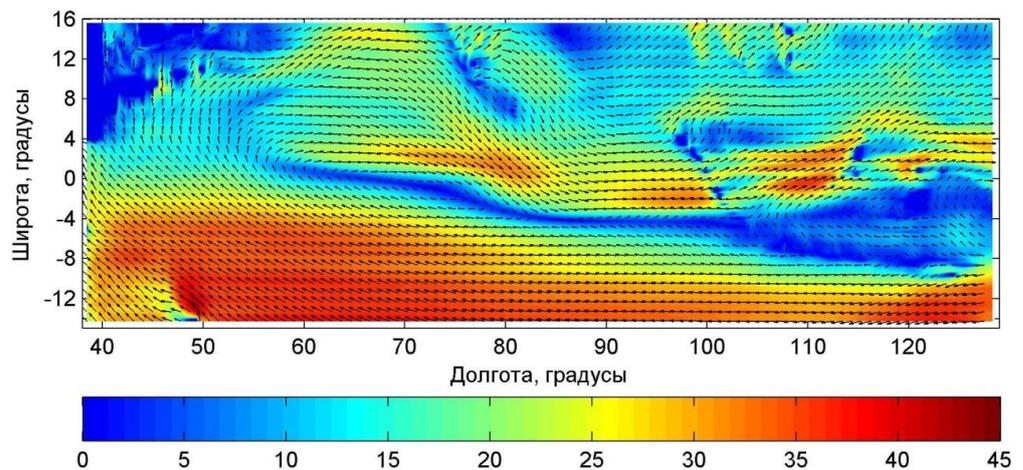


Рис.4. Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 2130 ч после начала моделирования (локальная область)

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 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.

Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Земли показало, что даже с использованием упрощенного способа нагрева атмосферы солнечным излучением можно получить качественную картину циркуляции, в которой имеют место основные тропосферные ячейки циркуляции (ячейки Хэдли, ячейки Ферреля и приполюсные ячейки) в обоих полушариях как для условий зимы, так и для лета. Из результатов моделирования видно, что учет рельефа поверхности существенным образом влияет на распределение горизонтального ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-00063.

Литература

1. Мингалев И. В., Орлов К. Г., Мингалев В. С. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 1. С. 501-514.
2. Обобщение монотонной гибридной схемы второго порядка для уравнений газовой динамики на случай нерегулярной пространственной сетки / В. С. Мингалев, И. В. Мингалев, О. В. Мингалев, А. М. Опарин, К. Г. Орлов // ЖВМ и МФ. 2010. Т. 50, № 5. С. 923-936.
3. Numerical modeling of the initial formation of cyclonic vortices at tropical latitudes / I. V. Mingalev, N. M. Astafieva, K. G. Orlov, V. S. Mingalev, O. V. Mingalev, V. M. Chechetkin // Atmospheric and Climate Sciences. 2014. Vol. 4. P. 899-906.

Сведения об авторах

Орлов Константин Геннадьевич,

к.физ.-мат.н., научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, orlov@pgia.ru

Мингалев Игорь Викторович,

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev_i@pgia.ru

Мингалев Виктор Степанович,

д.физ.-мат.н., профессор, заведующий сектором, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev@pgia.ru

Чечеткин Валерий Михайлович,

д.физ.-мат.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, г. Москва, chech@gin.keldysh.ru

Мингалев Олег Викторович,

к.физ.-мат.н., старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, mingalev_o@pgia.ru