

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.93-101

УДК 551.513:551.515.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АРКТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЫ И ВЛИЯНИЯ НА НЕЕ ГОРНЫХ МАССИВОВ ШПИЦБЕРГЕНА*

И. В. Мингалев, К. Г. Орлов, В. С. Мингалев

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

Аннотация

Циркуляция арктической нижней и средней атмосферы исследуется при помощи негидростатической математической модели, разработанной ранее в Полярном геофизическом институте. Используемая математическая модель основывается на численном решении системы уравнений газовой динамики в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до высоты 75 км. Математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы. Результаты расчетов показали, что рельеф планеты, в частности горные массивы Шпицбергена, должен оказывать заметное влияние на циркуляцию арктической нижней и средней атмосферы.

Ключевые слова:

арктическая атмосфера, циркуляция атмосферы, математическое моделирование.

NUMERICAL MODELING OF THE CIRCULATION OF THE ARCTIC LOWER AND MIDDLE ATMOSPHERE AND ITS DEPENDENCE ON THE SVALBARD'S MOUNTAINS

Igor V. Mingalev, Konstantin G. Orlov, Victor S. Mingalev

Polar Geophysical Institute, Apatity

Abstract

The circulation of the arctic lower and middle atmosphere is studied with the help of the non-hydrostatic mathematical model, developed earlier in the Polar Geophysical Institute. The utilized mathematical model is based on the numerical solution of the system of gas dynamic equations in the layer surrounding the Earth globally and stretching from its surface up to the altitude of 75 km. The relief of a planet is taken into account by the applied mathematical model. The mathematical model produces three-dimensional time-dependent distributions of the gas dynamic parameters of the atmosphere. To investigate the influence of the relief of a planet on the circulation of the arctic lower and middle atmosphere, calculations were made for two distinct cases. The relief of the planet was taken into account for the first case. Unlike, the Earth's surface was assumed to be smooth for the second case. Simulations were performed for the winter period in the northern hemisphere (January). Simulation results indicated that the relief of the planet, in particular the Svalbard's mountains, have to influence conspicuously on the circulation of the arctic lower and middle atmosphere.

Keywords:

arctic atmosphere, atmospheric circulation, mathematical modeling.



Введение

Для исследования динамики атмосферы в последние годы, наряду с теорией и экспериментом, стал успешно применяться метод математического моделирования. Несколько математических моделей общей циркуляции земной атмосферы было разработано в разных

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-03022.

странах в течение последних четырех десятилетий (см., например, работы [1–8]). В Полярном геофизическом институте также была разработана математическая модель общей циркуляции земной атмосферы, которая неоднократно усовершенствовалась и использовалась для исследования системы горизонтального и вертикального ветра в нижней и средней атмосфере Земли. В первоначально разработанном варианте модели, который был впервые описан в работе [9], считалось, что земная поверхность является сферической. Позже модель была усовершенствована таким образом, что в ней земная поверхность стала являться поверхностью сплюнутого с полюсов эллипсоида вращения [10], что лучше соответствует реальности. Затем модель была усовершенствована за счет учета самосогласованного теплового режима, и разные варианты модели использовались для исследования глобальной циркуляции земной атмосферы [11–17], однако в них земная поверхность считалась гладкой. Совсем недавно модель была усовершенствована за счет учета в ней рельефа поверхности Земли [18]. Именно этот вариант модели, учитывающий рельеф планеты, используется в настоящей работе.

Математическая модель

Математическая модель общей циркуляции земной атмосферы, используемая в настоящей работе, основывается на решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса, которая включает в себя уравнения Навье — Стокса для сжимаемого вязкого газа, а также уравнения неразрывности и теплопроводности для него. Модель позволяет рассчитывать трехмерные глобальные распределения зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости ветра атмосферного газа, его температуры и плотности на уровнях нижней и средней атмосферы Земли. Рассчитываемая в модели вертикальная скорость газа находится не из условия гидростатического равновесия, как это делается в большинстве моделей атмосферной циркуляции, а путем численного решения полного уравнения движения для вертикальной составляющей скорости без пренебрежения какими-либо членами. Поэтому применяемая численная модель является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью более точные результаты, чем с использованием аналогичных гидростатических моделей.

В применяемом варианте математической модели температура воздуха определяется путем решения уравнения теплопроводности для него. При вычислении входящей в это уравнение удельной мощности нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения использовано релаксационное приближение, в котором эта удельная мощность считается пропорциональной разности между рассчитываемой температурой и так называемой релаксационной температурой, которая задается. В качестве последней берется глобальное распределение температуры, определяемое по эмпирической модели NRLMSISE-00 [19].

Метод конечных разностей применяется для численного решения моделирующих уравнений, и при этом используется нерегулярная треугольная сетка в пространстве географических координат широта-долгота. Шаги сетки по долготе и широте задаются одинаковыми и равными $0,47^\circ$, по высоте шаг сетки равен 200 м. Математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до сферы, проходящей через уровень 75 км над поверхностью океана на экваторе. Считается, что Земля имеет форму сплюнутого с полюсов эллипсоида вращения. Граничные условия задаются таким образом, чтобы выполнялся закон сохранения массы в области расчетов. Подробное описание применяемой математической модели можно найти в работах [17, 18].

Результаты расчетов и их обсуждение

В настоящей работе представляются и обсуждаются результаты расчетов системы ветров в земной арктической атмосфере, полученные при помощи двух вариантов описанной выше математической модели, в первом из которых поверхность Земли считается гладкой, а во втором, недавно усовершенствованном, варианте модели учитывается рельеф земной поверхности.

Используемый в модели рельеф земной поверхности Северного полушария показан на карте, приведенной на рис. 1. Архипелаг Шпицберген лежит к северу от Скандинавии между $76^{\circ}26'$ и $80^{\circ}50'$ с. ш. и между 10° и 32° в. д.

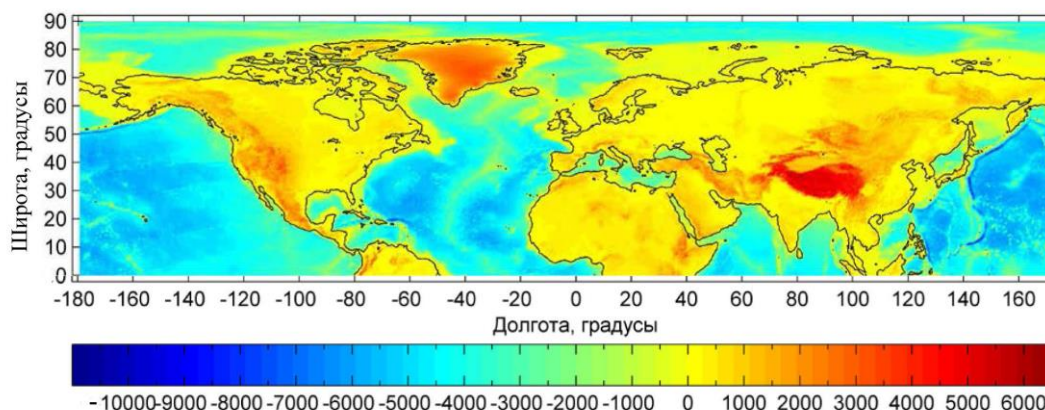


Рис. 1. Используемый в модели рельеф Северного полушария Земли.

Цвет показывает отклонение от уровня поверхности океана, м

Fig. 1. The utilized relief of the North Hemisphere of the Earth.

The colouration of the figure indicates the distance from the sea level in meters

Расчеты по двум используемым вариантам математической модели были выполнены при одинаковых входных параметрах модели, а также начальных и граничных условиях, и было проведено сравнение полученных результатов. Расчеты проводились для январских условий, когда в Северном полушарии зима.

Оказалось, что полученные по двум используемым вариантам математической модели результаты обладают рядом общих свойств. Так, в обоих случаях после начала расчетов пространственные распределения вычисляемых параметров начинают резко отходить от своих первоначальных значений, которые были заданы начальными условиями. В ходе дальнейших расчетов их изменения постепенно принимают квазипериодический характер, отражающий их суточные колебания. По истечении примерно 1000 часов физического времени результаты расчетов начинают хорошо воспроизводить суточную вариацию атмосферных параметров, которая обусловлена вращением Земли вокруг своей оси.

После того как расчеты вышли на квазипериодический режим, для момента 20.00 UT мы рассчитали и построили на разных высотных уровнях пространственные распределения скорости горизонтального и вертикального ветра, полученные по двум вариантам математической модели. Такие пространственные распределения скоростей ветра для высоты 20 км приведены на рис. 2 и 3, а для высоты 60 км они приведены на рис. 4 и 5, причем результаты расчетов представлены в той же системе координат, которая использовалась на рис. 1.

Расчеты показали, что полученные по двум используемым вариантам математической модели скорости горизонтального ветра являются сильно изменяющимися функциями широты, долготы и высоты. Существуют ограниченные по размерам горизонтальные области, в которых значения горизонтальной скорости имеют резкие градиенты. Горизонтальная скорость ветра может иметь сильно отличающиеся направления в точках, отстоящих друг от друга на не очень большие расстояния. Вертикальная скорость атмосферного газа может включать противоположные направления в имеющих различную форму горизонтальных областях.

В высоких широтах на уровне стратосферы горизонтальная скорость атмосферного газа имеет преимущественное направление на восток (рис. 2), причем такое движение воздушных масс получилось в модельных расчетах, выполненных как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности. Это движение воздушных масс формирует так называемый зимний циркумполярный циклон, о существовании которого в арктической атмосфере в зимний период

известно из многолетних наблюдений [20–22]. Тот факт, что в модельных расчетах воспроизводится зимний циркумполярный циклон, является одним из свидетельств адекватности применяемой математической модели.

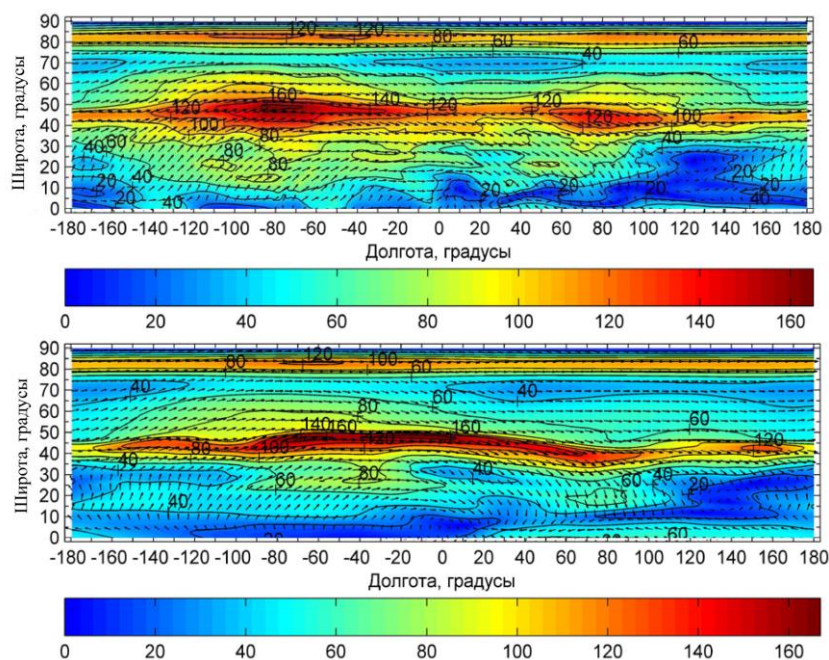


Рис. 2. Рассчитанные распределения вектора горизонтальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 20 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет показывает абсолютную величину скорости, м/с

Fig. 2. The simulated distributions of the vector of the horizontal component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the module of the velocity in m/s

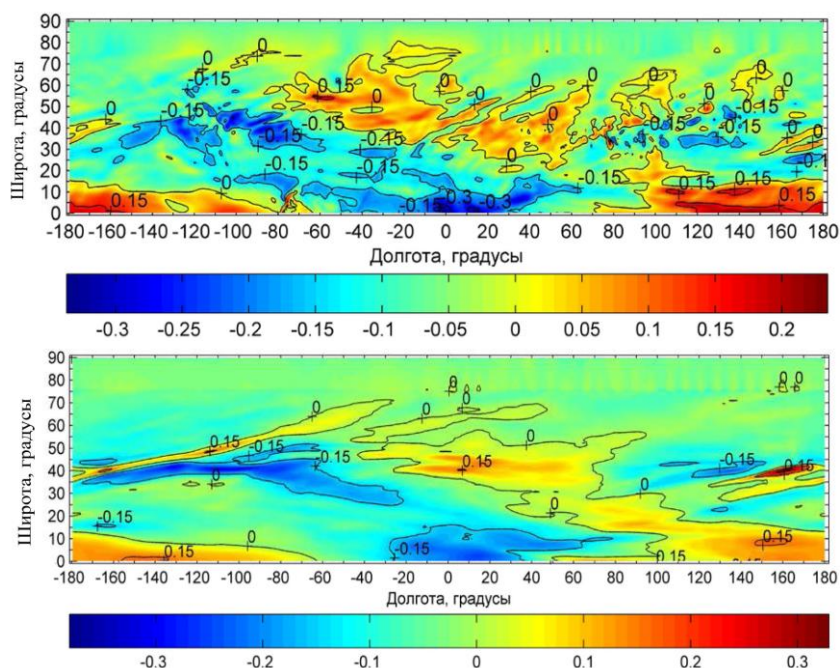


Рис. 3. Рассчитанные распределения вертикальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 20 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет указывает значение скорости (м/с), причем положительной считается направленная вверх скорость

Fig. 3. The simulated distributions of the vertical component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the quantity of the velocity in m/s, with the positive direction of the vertical velocity being upward

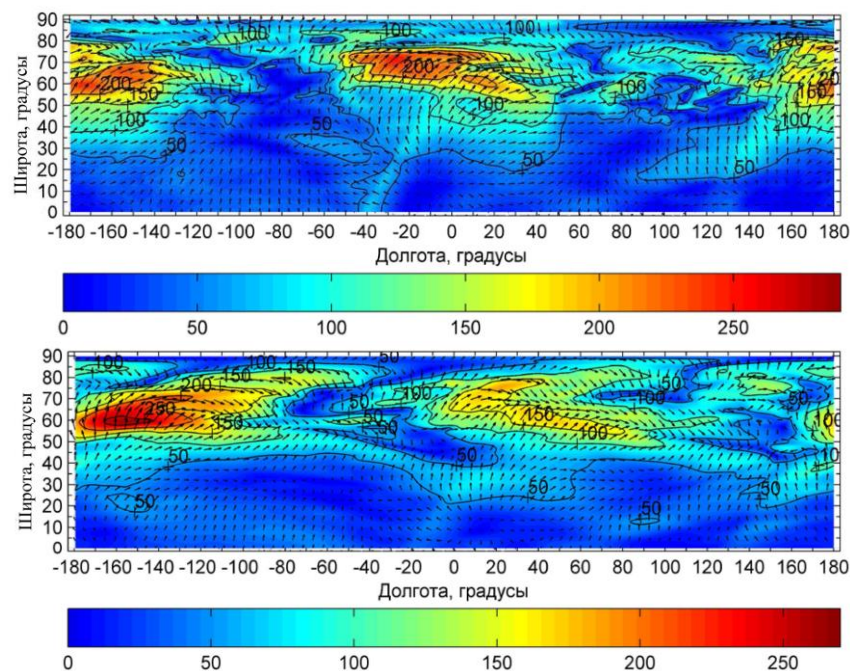


Рис. 4. Рассчитанные распределения вектора горизонтальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет показывает абсолютную величину скорости, м/с

Fig. 4. The simulated distributions of the vector of the horizontal component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 60 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the module of the velocity in m/s

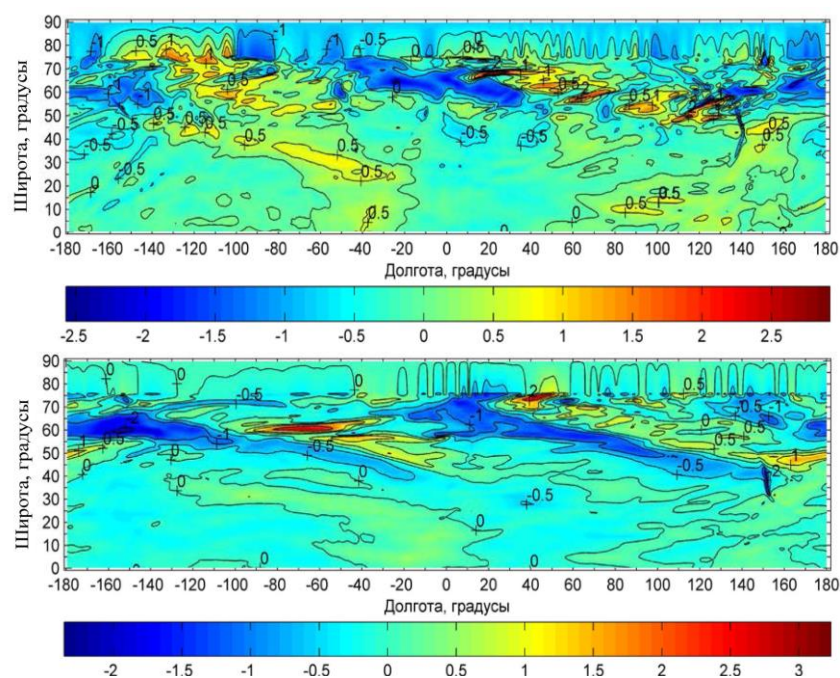


Рис. 5. Рассчитанные распределения вертикальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет указывает значение скорости (м/с), причем положительной считается направленная вверх скорость

Fig. 5. The simulated distributions of the vertical component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the quantity of the velocity in m/s, with the positive direction of the vertical velocity being upward

В целом результаты расчетов горизонтальной циркуляции арктической атмосферы, полученные как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности, на разных высотных уровнях нижней и средней атмосферы Земли оказались качественно похожими друг на друга, однако между ними обнаруживаются и определенные различия.

Так, на высотах нижней и средней атмосферы Северного полушария существуют горизонтальные области, в которых величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, имеют более высокие значения, чем величины этой компоненты скорости воздуха, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности. Наличие таких горизонтальных областей можно обнаружить, в частности, на рис. 2 и 4, где они присутствуют на широтах, больших 40° . Различие в величинах горизонтальных скоростей в этих областях может достигать нескольких десятков и даже 100 м/с (рис. 4). Оказывается, что некоторые из этих областей находятся непосредственно над располагающимися на земле горными массивами, в частности, над покрытой горами Гренландией, наивысшая вершина которой имеет высоту 3694 м.

Можно заметить, что различия в величинах горизонтальных скоростей в этих областях возрастают с повышением их высоты. Например, над некоторыми районами Гренландии на высоте 20 км эти они составляют порядка 10 м/с, а на высоте 60 км — превышают 100 м/с. Оказывается, что и горные массивы Шпицбергена, максимальная вершина которых достигает 1712 м, могут повлиять на величины горизонтальных скоростей над ними. Как видно из рис. 4, над южными районами Шпицбергена величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, могут превышать 200 м/с, в то время как величины этой компоненты скорости воздуха, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности, имеют в этих районах меньшие на несколько десятков метров в секунду значения.

Обратимся теперь к рассмотрению различий рассчитанных вертикальных составляющих скорости атмосферного газа. Из рис. 3 видно, что на высоте 20 км на арктических широтах, превышающих примерно 70° , рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности вертикальные составляющие скорости атмосферного газа направлены вниз, а их величины не превышают 10 см/с. Рассчитанные же с учетом рельефа земной поверхности вертикальные скорости воздуха направлены вниз на широтах, превышающих примерно 80° , где отсутствуют горы. На чуть менее северных широтах эти вертикальные скорости воздуха могут быть направлены не только вниз, но и вверх в некоторых зонах, в частности, над южными районами Гренландии, однако величины этих скоростей небольшие, они не превышают 15 см/с.

На более высоких уровнях различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут достигать заметно больших значений. Из рис. 5, например, видно, что на высоте 60 км на арктических широтах, превышающих примерно 70° , различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 1 м/с в некоторых зонах, а их направления могут быть противоположными. Можно заметить, что на высоте 60 км над Шпицбергеном вертикальные скорости, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности, направлены вниз и имеют значения, превышающие 0,5 м/с, в то время как вертикальные скорости, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, направлены вверх и их величины достигают 0,5 м/с. Таким образом, на высоте 60 км над Шпицбергеном различия вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 1 м/с, что является весьма большой величиной по сравнению с характерными для этого уровня значениями.

Как показали модельные расчеты, на высотах нижней и средней атмосферы Северного полушария существуют горизонтальные области, в частности располагающиеся над горными массивами, в которых различия в величинах горизонтальной и вертикальной компонент скорости воздушных масс, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, возрастают с повышением высоты. Этот факт кажется удивительным, так как при этом увеличивается расстояние от самих гор, являющихся причиной этих различий. Объяснение этого удивительного факта заключается, по-видимому, в следующем. Горизонтальные потоки воздуха, набегающие на горные массивы, порождают возмущения в виде вертикальных потоков над горами. Поскольку плотность атмосферы убывает с высотой, то эти возмущения увеличиваются по амплитуде с возрастанием высоты. Поэтому полученные в модельных расчетах различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, оказались возрастающими с повышением высоты. А поскольку вертикальные скорости существенно влияют на пространственные распределения горизонтальных скоростей, то и последние из упомянутых распределения претерпевают изменения, увеличивающиеся с высотой. Благодаря именно вертикальным движениям атмосферного газа осуществляется влияние рельефа земной поверхности на глобальную циркуляцию средней атмосферы.

Заключение

То, что рельеф земной поверхности оказывает влияние на систему ветров в самых нижних слоях атмосферы, является очевидным фактом, поскольку существуют горные массивы, достигающие высот в несколько километров. Более сложным является вопрос о том, как влияет рельеф земной поверхности на циркуляцию тех слоев атмосферы, которые располагаются выше самых высоких гор. Изучению именно этого вопроса для арктической атмосферы посвящена настоящая работа, в которой для этого исследования применяется метод математического моделирования. Использована негидростатическая математическая модель горизонтального и вертикального ветра в нижней и средней атмосфере Земли, которая была ранее разработана в Полярном геофизическом институте. Данная модель основывается на решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса для атмосферного газа и позволяет рассчитывать пространственно трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы на высотах до 75 км. Для исследования влияния рельефа планеты на циркуляцию арктической атмосферы были проведены расчеты для двух различных вариантов. В первом варианте рельеф планеты учитывался, во втором, напротив, земная поверхность считалась гладкой. Расчеты проводились для зимнего периода в Северном полушарии (для условий января).

Результаты численного моделирования показали, что главный фактор, который влияет на формирование горизонтальной циркуляции арктической атмосферы, — это пространственная неоднородность распределения температуры атмосферного газа, благодаря которой, в частности, возникает циркумполярный циклон в зимний период в Северном полушарии.

Результаты расчетов также показали, что рельеф планеты должен оказывать заметное влияние на пространственные распределения скорости горизонтального ветра в атмосфере Земли не только в прилегающем к земной поверхности слое атмосферы, но и на вышележащих уровнях средней атмосферы. Это воздействие осуществляется благодаря возмущениям вертикальных движений атмосферного газа, которые возникают в приземном слое в результате взаимодействия набегающих горизонтальных ветров с горными массивами. Возникшие возмущения вертикальных движений передаются вверх, причем их амплитуды возрастают с высотой вследствие происходящего при этом уменьшения плотности атмосферы. Возмущенные вертикальные движения атмосферного газа приводят к изменениям горизонтальной циркуляции атмосферы в имеющих ощутимые размеры областях, причем эти изменения увеличиваются с возрастанием высоты.

Расчеты показали, что горные массивы Гренландии и Шпицбергена способны изменить значения величин горизонтальной скорости ветра над ними на высотах средней атмосферы на десятки и даже сотню метров в секунду по сравнению с теми значениями, которые были бы, если бы этих горных массивов не было.

Можно отметить, что установление факта заметного влияния рельефа планеты на систему ветров в земной арктической атмосфере и физическое объяснение механизма, посредством которого это влияние осуществляется, оказалось возможным благодаря тому, что примененная математическая модель циркуляции атмосферы является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью результаты, недостижимые для аналогичных гидростатических моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Manabe S., Hahn D. G. Simulation of Atmospheric Variability // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, No. 11. P. 2260–2286.
2. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.
3. A General Circulation Model Simulation of the Springtime Antarctic Ozone Decrease and Its Impact on Mid-Latitudes / D. Cariolle [et al.] // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95, No. 2. P. 1883–1898.
4. The Impact of Upper-Tropospheric Aerosol on Global Atmospheric Circulation / H. F. Graf [et al.] // *Annales Geophys.* 1992. Vol. 10, No. 9. P. 698–707.
5. On the Response of a Three-Dimensional General Circulation Model to Imposed Changes in the Ozone Distribution / B. Christiansen [et al.] // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, No. D11. P. 13051–13078.
6. Harris M. J., Arnold N. F., Aylward A. D. A Study into the Effect of the Diurnal Tide on the Structure of the Background Mesosphere and Thermosphere Using the New Coupled Middle Atmosphere and Thermosphere (CMAT) General Circulation Model // *Annales Geophys.* 2002. Vol. 20, No. 2. P. 225–235.
7. The Climate during Maunder Minimum: A Simulation with Freie Universitat Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAT) / U. Langematz [et al.] // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. Vol. 67, No. 1–2. P. 55–69.
8. WACCM Simulations of the Mean Circulation and Trace Species Transport in the Winter Mesosphere / A. K. Smith [et al.] // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116D, No. 20, Article ID D20115. 17 p.
9. Mingalev I. V., Mingalev V. S. A numerical global model of the horizontal and vertical wind in the lower and middle atmosphere // *Proc. of the 24th Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena (Apatity, 27 February — 2 March, 2001)*. Apatity, 2001. P. 140–143.
10. Мингалева И. В., Мингалева В. С. Модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли при заданном распределении температуры // *Математическое моделирование*. 2005. Т. 17, №5. С. 24–40.
11. Mingalev I. V., Mingalev V. S., Mingaleva G. I. Numerical simulation of the global distributions of the horizontal and vertical wind in the middle atmosphere using a given neutral gas temperature field // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2007. Vol. 69, No. 4/5. P. 552–568.
12. Mingalev I. V., Mingalev O. V., Mingalev V. S. Model simulation of the global circulation in the middle atmosphere for January conditions // *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 15, No. 4. P. 11–16.
13. Mingalev I. V., Mingalev V. S., Mingaleva G. I. Numerical simulation of the global neutral wind system of the Earth's middle atmosphere for different seasons // *Atmosphere*. 2012. Vol. 3. P. 213–228.
14. Mingalev I., Mingalev V. Numerical modeling of the influence of solar activity on the global circulation in the Earth's mesosphere and lower thermosphere // *Intern. J. Geophys.* 2012. Article ID 106035. 15 p.
15. Mingalev I., Mingaleva G., Mingalev V. A simulation study of the effect of geomagnetic activity on the global circulation in the Earth's middle atmosphere // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2013. Vol. 3, No. 3A. P. 8–19. URL: <http://www.scirp.org/journal/acs>.
16. Mingalev I., Orlov K., Mingalev V. A computational study of the transformation of global gas flows in the Earth's atmosphere over the course of a year // *Open J. Fluid Dynamics*. 2014. Vol. 4. P. 379–402. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2014.44029>.
17. Mingalev I. V., Orlov K. G., Mingalev V. S. A computational study of the effect of geomagnetic activity on the planetary circulation of the Earth's atmosphere // *J. Advances in Physics*. 2016. Vol. 12, No. 4. P. 4451–4459.
18. Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли / Б. Н. Четверушкин [и др.] // *Математическое моделирование*. 2017. Т. 29, № 8. С. 59–73.
19. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone [et al.] // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107A, (S1A15). P. 1–16.
20. Кац А. Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 203 с.
21. Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 55 с.
22. Кантер Ц. А. Вертикальный профиль циркумполярного движения в 60-километровом слое атмосферы // *Исследование динамических процессов в верхней атмосфере*. М.: Гидрометеоиздат, 1983. С. 215–222.

Сведения об авторах

Мингалева Игорь Викторович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Полярного геофизического института

E-mail: mingalev_i@pgia.ru

Орлов Константин Геннадьевич — кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Полярного геофизического института

E-mail: orlov@pgia.ru

Мингалева Виктор Степанович — доктор физико-математических наук, профессор, зав. сектором вычислительного эксперимента Полярного геофизического института

E-mail: mingalev@pgia.ru

Author Affiliation

Igor V. Mingalev — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Leading Researcher of the Polar Geophysical Institute

E-mail: mingalev_i@pgia.ru

Konstantin G. Orlov — PhD (Physics & Mathematics), Scientific Secretary of the Polar Geophysical Institute

E-mail: orlov@pgia.ru

Victor S. Mingalev — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Professor, Head of Sector of Computational Experiment, Polar Geophysical Institute

E-mail: mingalev@pgia.ru

Библиографическое описание статьи

Мингалева, И. В. Численное моделирование циркуляции нижней и средней арктической атмосферы и влияния на нее горных массивов Шпицбергена / *И. В. Мингалева, К. Г. Орлов, В. С. Мингалева* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (9). — С. 93–101.

Reference

Mingalev Igor V., Orlov Konstantin G., Mingalev Victor S. Numerical Modeling of the Circulation of the Arctic Lower and Middle Atmosphere and Its Dependence on the Svalbard's Mountains. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 93–101 (In Russ.).