

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.198-201

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА ЗЕМЛИ НА ГЛОБАЛЬНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ ЕЕ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

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

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

Аннотация. Негидростатическая математическая модель общей циркуляции атмосферы, разработанная ранее в Полярном геофизическом институте, применяется для исследования влияния рельефа поверхности на планетарную циркуляцию средней атмосферы Земли. Применяемая математическая модель основана на численном решении системы газодинамических уравнений в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до высоты 75 км. Применяемая математическая модель принимает во внимание присутствие горных массивов. Расчеты были проведены для зимних условий в Северном полушарии (январь). Результаты моделирования показали, что рельеф планеты должен оказывать заметное влияние на глобальную циркуляцию средней атмосферы Земли.

Введение

На протяжении последних нескольких лет в Полярном геофизическом институте разрабатывалась, совершенствовалась и использовалась математическая модель общей циркуляции атмосферы Земли. В первоначально разработанном варианте модели, который был впервые описан в работе [1], температура воздуха не рассчитывалась, а являлась входным параметром модели; для задания температуры использовалась эмпирическая модель NRLMSISE-00 [2]. Кроме того, в первоначально разработанном варианте модели считалось, что Земля имеет форму шара. Позже модель была усовершенствована таким образом, что в ней стала приниматься в расчет несферичность земной поверхности, которая от сферической была преобразована в поверхность сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения [3]. В дальнейшем было проведено усовершенствование математической модели общей циркуляции атмосферы Земли за счет учета самосогласованного теплового режима. В усовершенствованном варианте модели температура считается уже не входным параметром модели, а вычисляется в результате решения уравнения теплового баланса атмосферного газа [4]. Этот вариант модели также был усовершенствован за счет учета в модели рельефа поверхности Земли [5]. Последний из упомянутых вариантов модели используется в настоящей работе для исследования влияния рельефа планеты на глобальную циркуляцию средней атмосферы Земли.

Математическая модель

Применяемая в настоящей работе математическая модель общей циркуляции атмосферы Земли основана на численном решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса, включающей в себя уравнения Навье-Стокса для сжимаемого вязкого газа, а также уравнений неразрывности и теплопроводности для него. Модель позволяет рассчитывать трехмерные глобальные распределения зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости атмосферного ветра, температуры и плотности воздуха на уровнях тропосферы, стратосферы и мезосферы Земли. В модели вертикальная скорость газа находится не из условия гидростатического равновесия, а путем численного решения полного уравнения движения для вертикальной составляющей скорости без пренебрежения какими-либо членами. При этом все три компоненты скорости рассчитываются при помощи численного решения полных уравнений движения вязкого сжимаемого газа, и уравнение гидростатики не применяется, таким образом, математическая модель является негидростатической.

При вычислении входящей в уравнение теплового баланса удельной мощности нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения использовано релаксационное приближение, в котором эта мощность считается пропорциональной разности между рассчитываемой температурой и задаваемой так называемой релаксационной температурой, в качестве которой берется распределение температуры, определяемое по эмпирической модели NRLMSISE-00 [2].

В настоящей работе используются два варианта математической модели, в которых считается, что Земля имеет форму сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения, однако, в первом варианте поверхность планеты считается гладкой, а во втором варианте модели учитывается рельеф земной поверхности. Для численного решения моделирующих уравнений применяется метод конечных разностей и используется нерегулярная треугольная сетка в пространстве географических координат широта-долгота. При этом применяется явная

разностная схема, основанная на вычислении потоков массы и импульса через грани контрольного объема узла сетки по специальной методике, которая является обобщением известной явной гибридной монотонной схемы второго порядка точности для одномерного уравнения неразрывности.

Применяемая математическая модель позволяет рассчитывать параметры атмосферы в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до сферы, проходящей через уровень 75 км над поверхностью океана на экваторе. Подробное описание применяемой математической модели и используемых в ней уравнений можно найти в [3-5].

Результаты расчетов и их обсуждение

Нами были проведены расчеты по установлению влияния рельефа поверхности планеты на глобальные распределения скорости горизонтального и вертикального ветра, а также плотности и температуры атмосферы Земли для условий зимы в Северном полушарии (для января). Для этих условий были выполнены численные расчеты общей циркуляции атмосферы по двум вариантам математической модели: в первом варианте земная поверхность считалась гладкой, а во втором варианте учитывался рельеф земной поверхности. Используемый в модели рельеф Земли показан на рис. 1. 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.

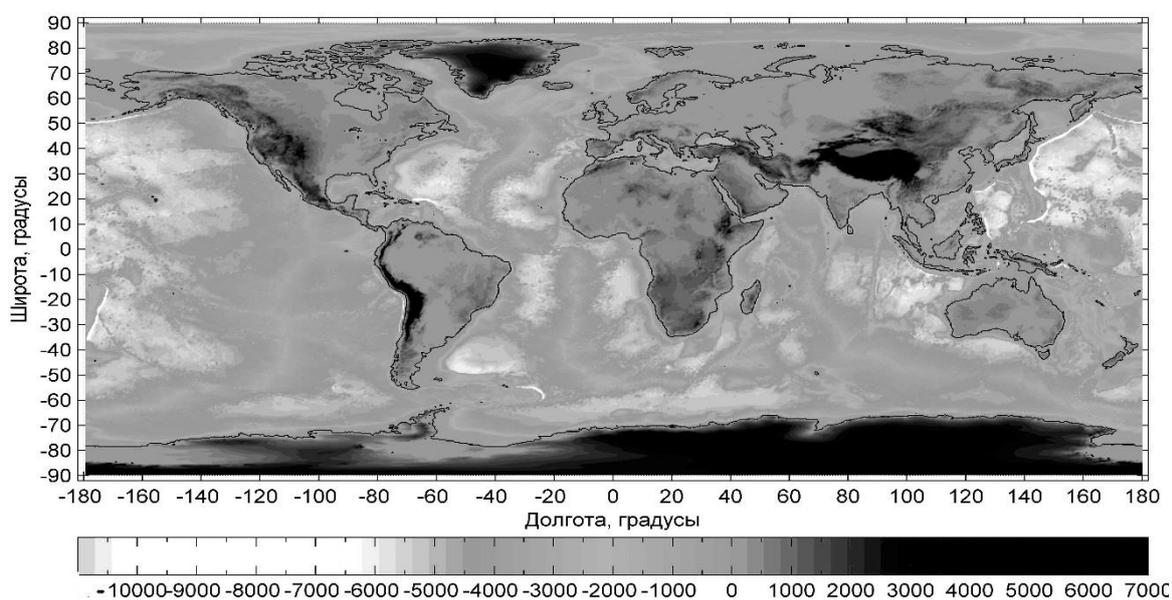


Рисунок 1. Используемый в модели рельеф Земли. Степень затемнения указывает отклонение от уровня поверхности океана в метрах.

Оказалось, что полученные результаты обладают рядом общих свойств. После начала расчетов распределения вычисляемых параметров начинают резко отходить от своих первоначальных значений, определяемых начальными условиями. В дальнейшем их изменения постепенно принимают квазипериодический характер, отражающий их суточные колебания. По прошествии 1000 часов физического времени результаты расчетов начинают хорошо воспроизводить суточную вариацию атмосферных параметров, обусловленную вращением Земли вокруг своей оси.

Мы рассчитали и построили на разных высотных уровнях глобальные распределения скорости горизонтального и вертикального ветра, полученные по двум вариантам математической модели, для момента 20.00 UT после того, как расчеты вышли на квазипериодический режим. Примеры таких глобальных распределений приведены на рис. 2, на котором результаты расчетов представлены в той же системе координат, которая использовалась на рис. 1.

Результаты моделирования показали, что в зимних условиях глобальные циркуляции атмосферы, рассчитанные на разных высотных уровнях средней атмосферы Земли как в приближении гладкой земной поверхности, так и при учете рельефа земной поверхности, весьма похожи друг на друга. Это свидетельствует о том, что главным фактором, влияющим на формирование глобальной горизонтальной циркуляции атмосферы, является пространственная неоднородность распределения температуры атмосферного газа.

Однако, оказалось, что между результатами численного моделирования, полученными в приближении гладкой земной поверхности и полученными при учете рельефа земной поверхности, имеются ощутимые

различия. Например, существуют горизонтальные области, в которых величины горизонтальной компоненты скорости нейтрального ветра, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, имеют более высокие значения, чем величины этой компоненты скорости нейтрального ветра, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности. Наличие таких горизонтальных областей можно обнаружить, в частности, на рис. 2, где они присутствуют как в Северном полушарии на широтах от 40 до 80 градусов, так и в Южном полушарии на широтах от -30 до -60 градусов. Различие в величинах горизонтальных скоростей в этих областях может достигать нескольких десятков метров в секунду. Нетрудно заметить, что некоторые из этих областей находятся непосредственно над располагающимися на земле горными массивами, в частности, над Гренландией, наивысшая вершина которой достигает 3694 м, над находящимся в Индийском океане архипелагом Кергелен, высота гор на котором достигает 1850 м, над горами Северной Америки, достигающими высоты 6190 м.

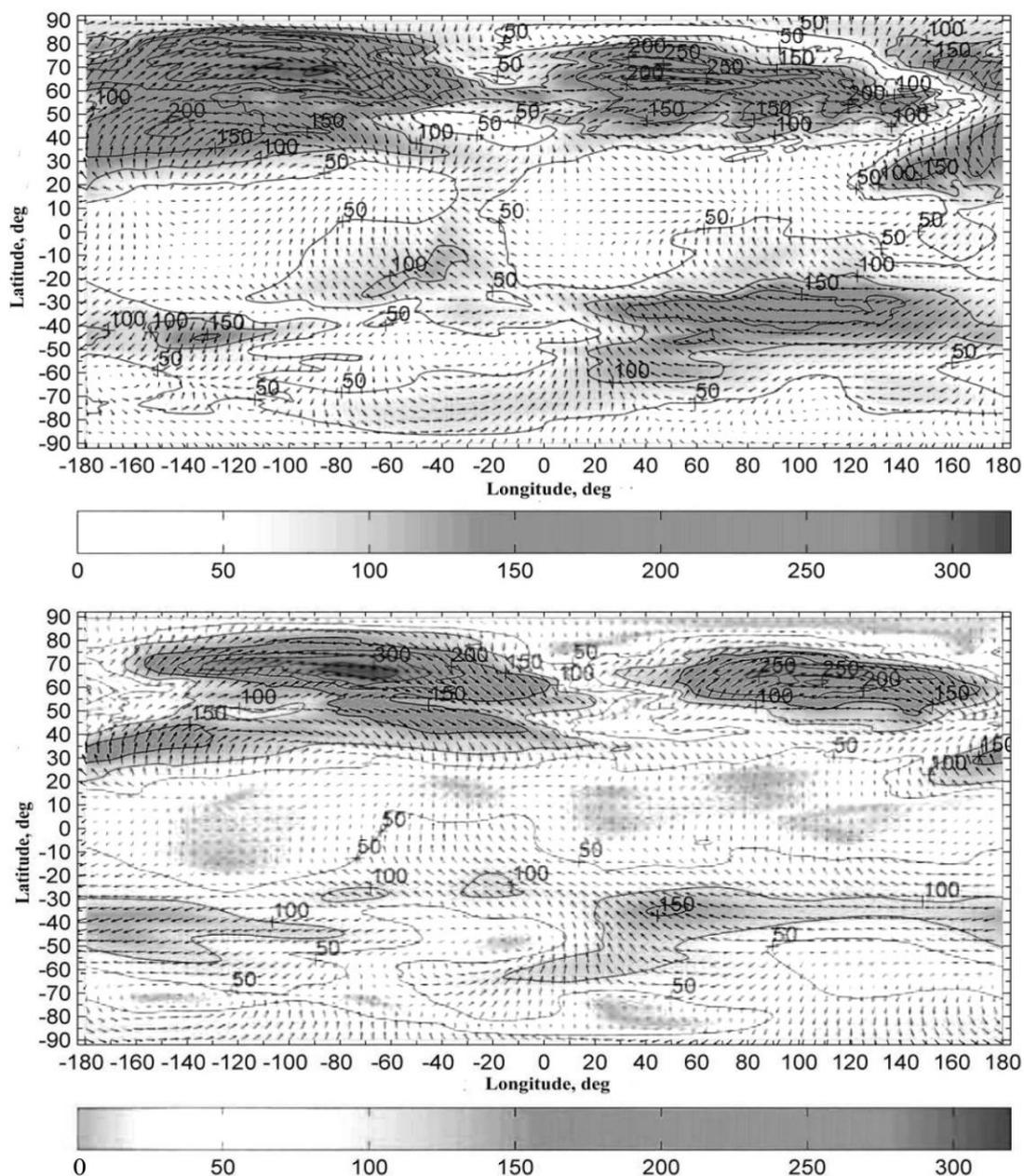


Рисунок 2. Рассчитанные горизонтальные составляющие скорости атмосферного ветра на высоте 50 км, полученные с учетом рельефа (*вверху*) и в приближении гладкой земной поверхности (*внизу*). Стрелки указывают направление, а их длина и яркость фона — величину скорости ветра в м/с.

Результаты расчетов также показали, что в тех горизонтальных областях, где рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности величины горизонтальной компоненты скорости атмосферного ветра превышают такие же величины, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности, как правило, различаются и величины вертикальной компоненты скорости атмосферного газа, т.е. нерегулярный рельеф планеты вызывает возмущения вертикальной компоненты скорости атмосферного газа. Эти возмущения 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 и приводят к изменениям горизонтальной циркуляции атмосферы, причем эти изменения, как показали расчеты, увеличиваются с возрастанием высоты.

Можно отметить, что проведенные расчеты позволили установить факт заметного влияния рельефа планеты на глобальную циркуляцию средней атмосферы и дать физическое объяснение механизма, посредством которого это влияние осуществляется, благодаря тому, что примененная математическая модель глобальной циркуляции атмосферы является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью результаты, недостижимые для аналогичных гидростатических моделей.

Заключение

Методом математического моделирования проведено исследование влияния рельефа планеты на глобальную циркуляцию средней атмосферы Земли. Применена негидростатическая математическая модель общей циркуляции атмосферы Земли, основанная на численном решении системы газодинамических уравнений в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до высоты 75 км. Используются два варианта этой математической модели, в которых предполагается, что Земля имеет форму сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения, причем в первом варианте поверхность планеты считается гладкой, а во втором варианте модели учитывается рельеф земной поверхности. Для январских условий были выполнены численные расчеты общей циркуляции атмосферы по двум указанным вариантам математической модели, и было проведено сравнение полученных результатов.

Расчеты показали, что на уровнях стратосферы и мезосферы могут существовать горизонтальные области, в которых горизонтальные и вертикальная компоненты скорости нейтрального ветра, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, могут существенно отличаться от аналогичных компонент скорости, рассчитанных в приближении гладкой земной поверхности. Установлено, что благодаря именно вертикальным движениям атмосферного газа, осуществляется влияние рельефа земной поверхности на глобальную циркуляцию средней атмосферы. Вызванные наличием горных массивов возмущения вертикальных движений передаются вверх, усиливаясь с возрастанием высоты, и приводят к изменениям пространственных распределений горизонтальных скоростей атмосферного газа.

Таким образом, результаты моделирования показали, что рельеф планеты должен оказывать заметное влияние на глобальные распределения скорости ветра в земной атмосфере в январских условиях не только в прилегающей к земной поверхности тропосфере, но и на вышележащих уровнях средней атмосферы Земли.

Список литературы

1. Mingalev I.V., Mingalev V.S. A numerical global model of the horizontal and vertical wind in the lower and middle atmosphere // Proceedings of the 24 th Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena, (Apatity, 27 February-2 March, 2001). Apatity: KSC RAS, PGI. 2001. P.140-143.
2. 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. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A12. P.1468-1483.
3. 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. Doi: 10.3390/atmos 3010213.
4. 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 // Journal of Advances in Physics. 2016. V.12. No.4. P. 4451-4459.
5. Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Орлов К.Г., Четкин В.М., Мингалев В.С., Мингалев О.В. Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 8. С. 59-73.