

УДК 551.513:551.515.2

ВОЗМУЩЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ВЫЗВАНЫ ИЗОЛИРОВАННЫМ ГОРНЫМ МАССИВОМ

© 2024 г. И. В. Мингалёв¹, К. Г. Орлов¹, В. С. Мингалёв¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: mingalev@pgia.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Представлены результаты численного моделирования, направленные на исследование влияния земного рельефа на циркуляцию нижней и средней атмосферы. Основное внимание сконцентрировано на влиянии изолированного горного массива на циркуляцию нижних и средних слоев атмосферы в окрестностях этого массива. Горы и утесы, покрывающие архипелаг Кергелен, выбраны в качестве изолированного горного массива.

DOI: 10.31857/S0367676524030184, EDN: QLCUYU

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для исследования динамики атмосферы стал успешно применяться метод математического моделирования наряду с теорией и экспериментом. В течение последних четырех десятилетий несколько математических моделей общей циркуляции земной атмосферы было разработано в разных странах, например [1–8]. В начале 2000-х гг. в Полярном геофизическом институте также была разработана математическая модель общей циркуляции земной атмосферы, которая неоднократно усовершенствовалась и использовалась для исследования системы горизонтального и вертикального ветров в нижней и средней атмосфере Земли [9–19]. Эта математическая модель используется и в настоящей работе, в которой приводятся и анализируются результаты расчетов системы горизонтального и вертикального ветров в земной атмосфере в январских условиях, а также исследуется влияние земного рельефа на циркуляцию нижней и средней атмосферы. Основное внимание сконцентрировано на влиянии изолированного горного массива на циркуляцию нижних и средних слоев атмосферы в окрестностях этого изолированного горного массива, в качестве которого выбраны горы и утесы, покрывающие архипелаг Кергелен, лежащий в Индийском океане.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Разработанная в Полярном геофизическом институте и применяемая в настоящей работе математическая модель общей циркуляции земной атмосферы основывается на решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса. Эта система 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. Вертикальная скорость газа, рассчитываемая в модели, 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. Следовательно, применяемая численная модель является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью более точные результаты, чем с использованием аналогичных гидростатических моделей.

В используемом варианте математической модели температура воздуха находится 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 релаксационной температуры берется глобальное распределение температуры, определяемое по эмпирической модели NRLMSISE-00 [20].

Метод конечных разностей применяется для численного решения моделирующих уравнений. При этом используется нерегулярная треугольная сетка в пространстве географических координат широта—долгота. Выходными параметрами математической модели являются 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 сплюснутого 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 [17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования влияния земного рельефа на циркуляцию нижней и средней атмосферы нами была применена описанная выше математическая модель. В настоящей работе представляются и обсуждаются результаты расчетов системы ветров в земной атмосфере, полученные с помощью двух вариантов модели. В первом варианте модели вся без исключений поверхность Земли считается гладкой и находящейся на уровне океана, а во втором варианте модели учитывается рельеф земной поверхности на всех материках и островах без исключений.

Используемый в модели рельеф земной поверхности показан на карте, приведенной на рис. 1. Можно отметить, что отрицательные значения на этом рисунке не учитываются в расчетах, поскольку атмосфера находится выше уровня океана.

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, а в Южном полушарии — лето.

Расчеты показали, что полученные по двум используемым вариантам математической модели

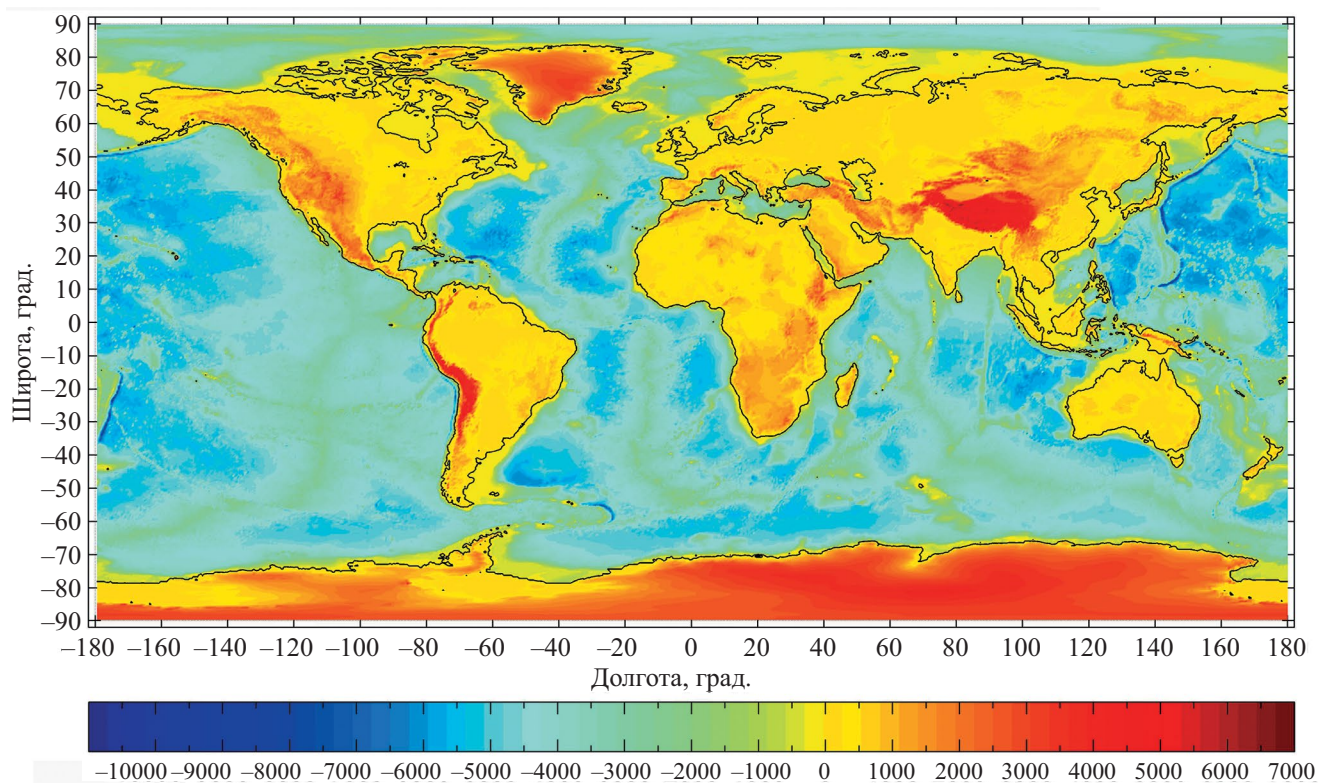


Рис. 1. Используемый в модели рельеф Земли. Цвет указывает отклонение от уровня поверхности океана в метрах.

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 ч физического времени результаты расчетов начинают хорошо воспроизводить суточную вариацию атмосферных параметров, которая обусловлена вращением Земли вокруг своей оси.

После выхода решения на квазипериодический режим в процессе вычислений 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.

Поскольку в настоящей работе основное внимание сконцентрировано на влиянии изолированного горного массива на атмосферную циркуляцию, а в качестве горного массива выступают горы и утесы, покрывающие архипелаг Кергелен, лежащий в Индийском океане, то мы будем приводить результаты расчетов для Южного полушария, в котором и лежит архипелаг Кергелен. Такие пространственные распределения скоростей ветра для высоты 20 км приведены на рис. 2, а для высоты 50 км они приведены на рис. 3, причем результаты расчетов представлены в той же системе координат, которая использовалась на рис. 1.

Оказалось, 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. Оказалось, что горизонтальная скорость ветра может иметь сильно отличающиеся направления в точках, отстоящих друг от друга на не очень большие расстояния. Вертикальная скорость атмосферного газа может иметь противоположные направления в имеющих различную форму горизонтальных областях.

В высокоширотной области Южного полушария на уровнях стратосферы горизонтальная скорость атмосферного газа имеет преимущественное направление на восток (см. рис. 2). Причем такое движение воздушных масс получилось в модельных расчетах, выполненных как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности. Такое движение воздушных масс формирует так называемый летний циркумполярный антициклон, о существовании которого в антарктической атмосфере в летний период известно из

многолетних наблюдений [21–23]. Тот факт, что в модельных расчетах воспроизводится летний циркумполярный антициклон, является одним из свидетельств адекватности применяемой математической модели.

Видно, что результаты расчетов горизонтальной циркуляции атмосферы Южного полушария, полученные как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности, на разных высотных уровнях нижней и средней атмосферы оказываются качественно похожими. Однако между ними обнаруживаются и определенные различия. Эти различия хорошо видны при сравнении панелей *a* и *b* на рис. 2 и 3.

Так, на высотах нижней и средней атмосферы Южного 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. Различия в величинах горизонтальных скоростей в этих областях может достигать нескольких десятков метров в секунду (см. рис. 2 и 3). Оказывается, что некоторые из этих областей находятся непосредственно над расположенными на земле горными массивами.

Ярким примером описанной ситуации является присутствующая на рис. 2 область, лежащая неподалеку от точки с координатами 50° ю.ш. и 70° в.д. В этой области 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; превышение достигает 40 м/с. Обсудим возможные причины этой особенности.

Оказывается, что точку с координатами 50° ю.ш. и 70° в.д. окружает архипелаг Кергелен (см. рис. 1). Этот архипелаг возвышается над поверхностью находящегося вокруг него Индийского океана. Этот архипелаг покрыт горами с наивысшей вершиной 1850 м. Протяженность этого архипелага в горизонтальных направлениях, не достигающая 200 км, оказывается многократно меньшей его расстояний до окружающих Индийский океан материков, от которых он изолирован огромными водными пространствами. Покрывающий этот архипелаг горный массив, по-видимому, и является причиной обсуждаемой особенности.

Если обратиться к рис. 3, то можно увидеть, что на высоте 50 км над архипелагом Кергелен величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, имеют более высокие значения, чем величины этой компоненты скорости воздуха,

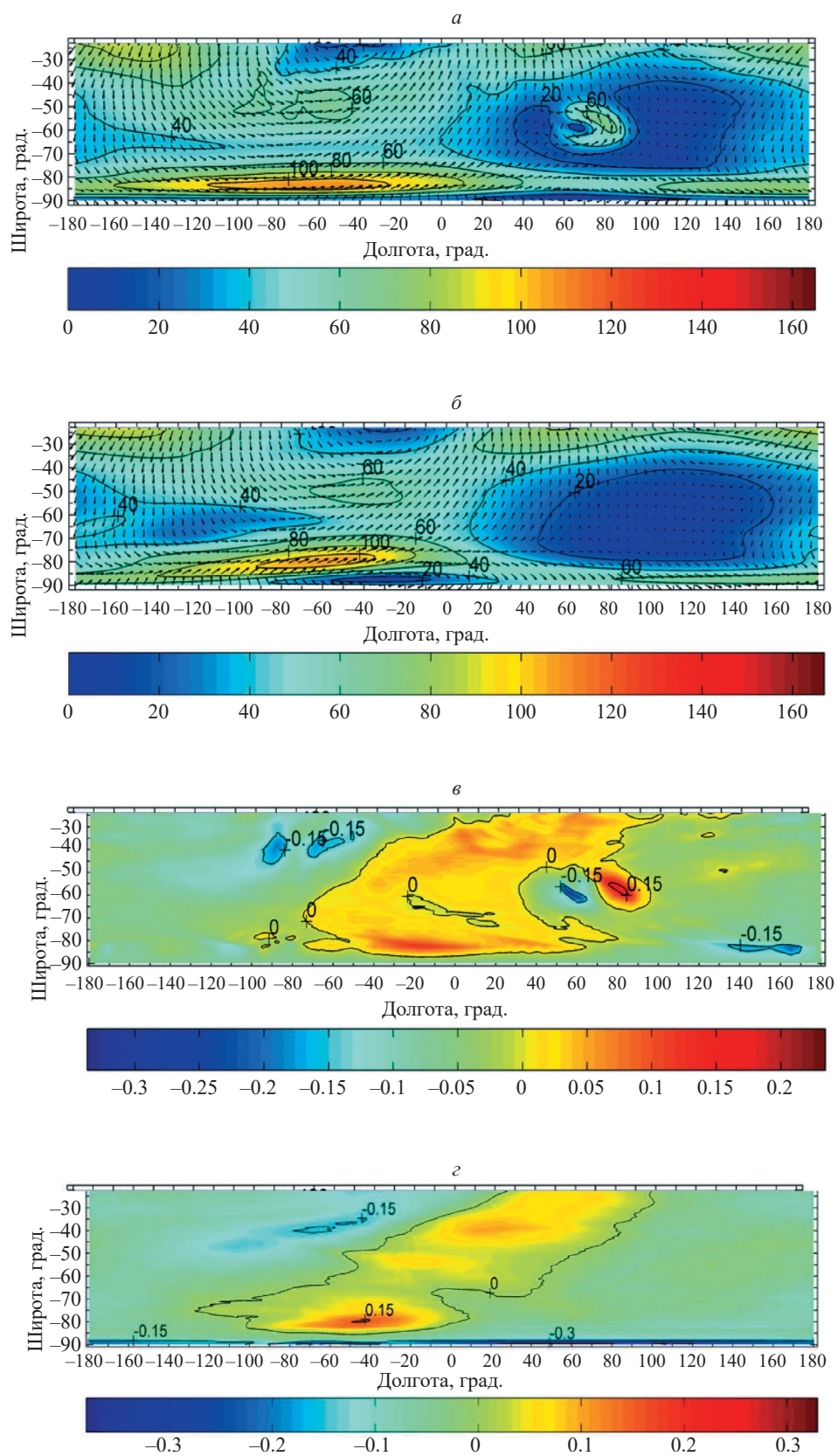


Рис. 2. Рассчитанные на высоте 20 км горизонтальные (*а*, *б*) и вертикальные (*в*, *г*) составляющие скорости атмосферного газа в Южном полушарии, полученные с учетом рельефа (*а*, *в*) и в приближении гладкой земной поверхности (*б*, *г*). Стрелки указывают направление, а цвет фона — величину скорости ветра, м/с; положительной считается направленная вверх вертикальная скорость.

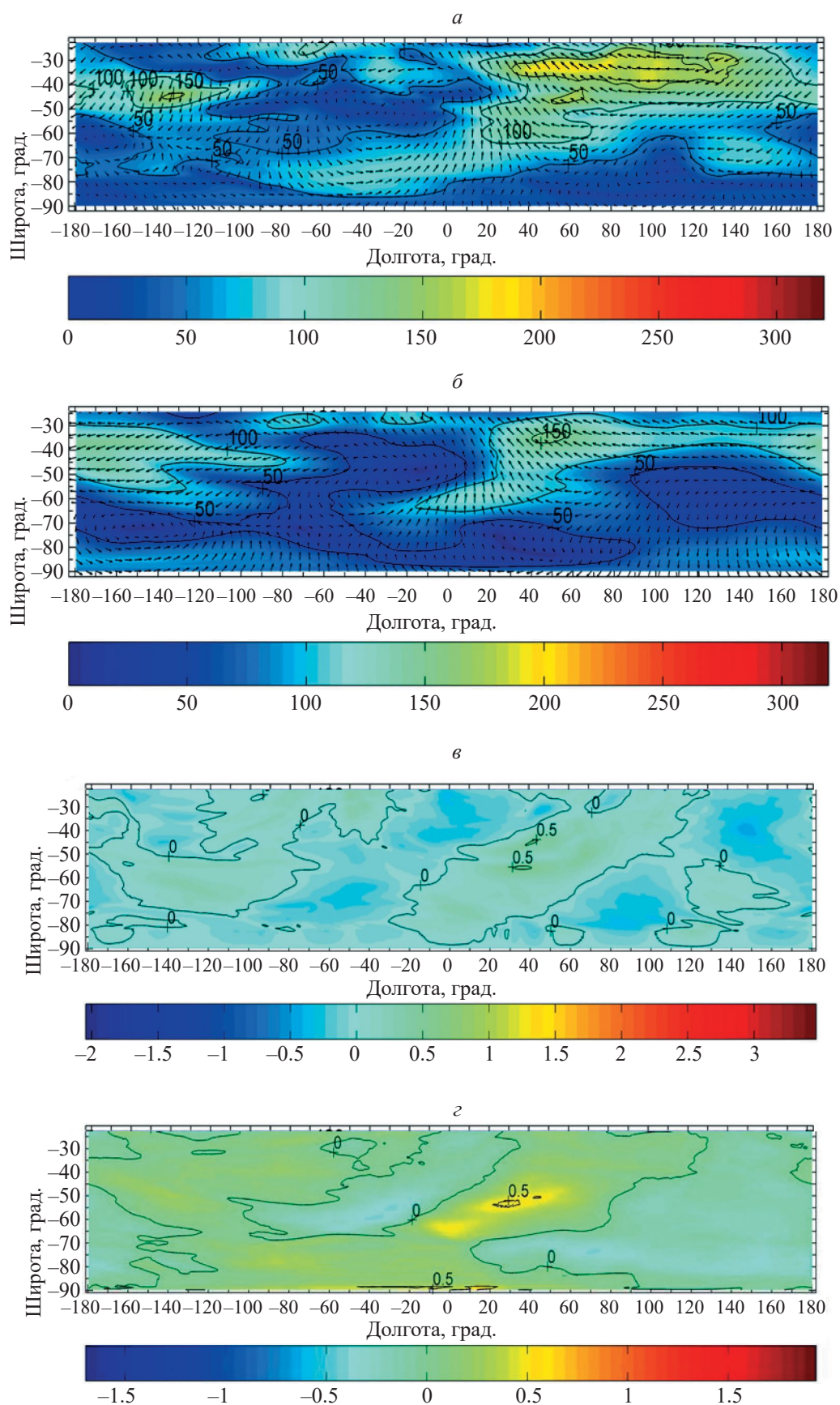


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для высоты 50 км.

рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности; превышение достигает 50 м/с.

Рассмотрим теперь различия рассчитанных вертикальных составляющих скорости атмосферного газа. Из рис. 2 видно, что на высоте 20 км в Южном полушарии рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности и в приближении гладкой земной поверхности вертикальные составляющие скорости атмосферного газа могут различаться в одних и тех же точках пространства, а величины различий могут достигать 0.15 м/с. На указанной высоте такая ситуация имеет место в окрестностях архипелага Кергелен.

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. 3, например, видно, что на высоте 50 км в Южном полушарии в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 0.5 м/с в некоторых зонах.

Расчеты показали, что различия горизонтально-го и вертикального ветра, обусловленные влиянием земного рельефа, оказываются различными на разных высотах. Причем эти различия 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. Набегающие на горные массивы горизонтальные потоки воздуха порождают возмущения в виде вертикальных потоков над горами. Так как плотность атмосферы убывает с высотой, то эти возмущения увеличиваются по амплитуде с возрастанием высоты, поскольку импульс стремится к сохранению. Вследствие этого полученные в модельных расчетах различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, оказались возрастающими с повышением высоты. А так как вертикальные скорости существенно влияют на пространственные распределения горизонтальных скоростей, то и последние из упомянутых распределения претерпевают изменения, увеличивающиеся с высотой. Таким образом, благодаря именно вертикальным движениям атмосферного газа осуществляется влияние рельефа земной поверхности на глобальную циркуляцию средней атмосферы.

Заметим, что установление факта ощутимого влияния рельефа планеты на систему ветров в земной атмосфере и объяснение физического механизма, посредством которого это влияние осуществляется, оказалось возможным благодаря тому, что примененная математическая модель циркуляции атмосферы является негидростатической.

Можно вспомнить, что применяемые в настоящей работе два варианта модели, в первом из которых поверхность Земли считается гладкой, а во втором варианте модели учитывается рельеф земной поверхности, использовались ранее, в частности, в работах [24, 25]. В работе [24] были представлены результаты численного моделирования циркуляции нижней и средней арктической атмосферы и влияния на нее горных массивов архипелага Шпицберген. В работе [25] были представлены результаты аналогичного численного моделирования циркуляции нижней и средней антарктической атмосферы и ее зависимости от земного рельефа, в частности, от горных массивов, покрывающих Антарктиду.

Представленные в работах [24, 25] и в настоящей работе результаты, касающиеся влияния горных массивов на циркуляцию нижней и средней атмосферы, обладают как рядом общих закономерностей, так и различиями, обусловленными спецификой крупномасштабных атмосферных течений. Например, общей закономерностью является то, что горные массивы способны увеличивать значения горизонтальной скорости ветра над ними на высотах средней атмосферы на весьма заметные величины (десятки метров в секунду) по сравнению с теми значениями, которые были бы, если бы этих горных массивов не было. Однако относительные увеличения горизонтальной скорости ветра могут быть заметно различающимися в разных регионах Земли над схожими горными массивами. Например, над архипелагом Кергелен и над архипелагом Шпицберген, которые оба покрыты близкими по размерам и высотам горными массивами. Более высокие горизонтальные скорости ветра над архипелагом Шпицберген обусловлены тем, что он лежит в зоне усиленных восточных стратосферных ветров, обусловленных наличием циркумполярного циклона в зимний период в Северном полушарии.

Оказывается, одинаковым в разных регионах Земли является физический механизм, посредством которого осуществляется ощутимое влияние отдельного горного массива на систему ветров в земной средней атмосфере над ним. Этот механизм был описан выше в этом разделе данной статьи. Там этот физический механизм был проанализирован на примере воздействия горного массива, покрывающего архипелаг Кергелен. Для иллюстрации действия отдельных элементов этого физического механизма архипелаг Кергелен подходит наилучшим образом благодаря своему уникальному местоположению. А находится он в Индийском океане на большом удалении от материков и других гор, т.е. является хорошо изолированным горным массивом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализированы результаты численного моделирования крупномасштабной циркуляции нижней и средней атмосферы, моделирование было проведено в целях выявления влияния земного рельефа на эту циркуляцию. Моделирование было выполнено для летнего периода в Южном полушарии (январь). Результаты получены по двум различающимся вариантам одной и той же математической модели, которые были ранее разработаны в Полярном геофизическом институте. В первом варианте земная поверхность считалась гладкой. Во втором варианте рельеф планеты учитывался. Применяемая численная модель является негидростатической, в ней вертикальная скорость газа находится путем численного решения полного уравнения движения без пренебрежения какими-либо членами. При этом условие гидростатического равновесия не применяется.

Результаты численного моделирования показали, что главным фактором, влияющим на формирование горизонтальной циркуляции атмосферы, является пространственная неоднородность распределения температуры атмосферного газа, благодаря которой, в частности, возникает в летний период в Южном полушарии циркуполярный антициклон, воспроизведенный в модельных расчетах.

Также результаты расчетов 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.

Для выявления физического механизма, посредством которого это влияние осуществляется, мы детально рассмотрели результаты расчетов на разных высотах в окрестностях архипелага Кергелен, на котором располагается изолированный горный массив. Выяснилось, что наличие этого влияния возможно благодаря возмущениям вертикальных движений атмосферного газа, которые возникают в приземном слое в результате взаимодействия набегающих горизонтальных ветров с горными массивами. Возмущения вертикальных движений, возникшие в приземном слое, 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 способны изменить значения величин горизонтальной скорости ветра над ними на высотах средней

атмосферы на десятки метров в секунду по сравнению с теми значениями, которые были бы, если бы этих горных массивов не было.

Действие описанного выше физического механизма, посредством которого осуществляется ощутимое влияние отдельного горного массива на систему ветров в земной средней атмосфере над ним, было проанализировано в окрестностях архипелага Кергелен. Этот же физический механизм, как показывают предшествующие работы авторов [24, 25], действует над горными массивами, находящимися и в других регионах Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manabe S., Hahn D.G.* // Mon. Weather Rev. 1981. V. 109. No. 11. P. 2260.
2. *Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б.* Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
3. *Cariolle D., Lasserre-Bigorry A., Royer J.-F., Geleyn J.-F.* // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. No. 2. P. 1883.
4. *Graf H.F., Kirchner I., Sausen R., Schubert S.* // Ann. Geophys. 1992. V. 10. No. 9. P. 698.
5. *Christiansen B., Guldberg A., Hansen A.W., Riishojgaard L.P.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. D11. P. 13051.
6. *Harris M.J., Arnold N.F., Aylward A.D.* // Ann. Geophys. 2002. V. 20. No. 2. P. 225.
7. *Langematz U., Claussnitzer A., Matthes K., Kunze M.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. No. 1-2. P. 55.
8. *Smith A.K., Garcia R.R., Marsh D.R., Richter J.H.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116D. No. 20. Art. No. ID D20115.
9. *Mingalev I.V., Mingalev V.S.* // Proc. 24th Ann. Seminar. Phys. Auroral Phenom. (Apatity, 2001). P. 140.
10. *Мингалева И.В., Мингалева В.С.* // Матем. модел. 2005. Т. 17. № 5. С. 24.
11. *Mingalev I.V., Mingalev V.S., Mingaleva G.I.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. No. 4/5. P. 552.
12. *Mingalev I.V., Mingalev O.V., Mingalev V.S.* // Adv. Geosci. 2008. V. 15. No. 4. P. 11.
13. *Mingalev I.V., Mingalev V.S., Mingaleva G.I.* // Atmosphere. 2012. V. 3. P. 213.
14. *Mingalev I., Mingalev V.* // Int. J. Geophys. 2012. Art. No. ID 106035.
15. *Mingalev I., Mingaleva G., Mingalev V.* // Atmos. Climate Sci. 2013. V. 3. No. 3A. P. 8.
16. *Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S.* // Open J. Fluid Dynam. 2014. V. 4. P. 379.
17. *Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S.* // J. Adv. Phys. 2016. V. 12. No. 4. P. 4451.

18. Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Орлов К.Г. и др. // Матем. модел. 2017. Т. 29. № 8. С. 59.
19. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Федотова Е.А., Мингалев В.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 434; Mingalev I.V., Orlov K.G., Fedotova E.A., Mingalev V.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 353.
20. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107A (SIA15). P. 1.
21. Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 203 с.
22. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 55 с.
23. Кантер Ц.А. Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. М.: Гидрометеиздат, 1983. С. 215.
24. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. // Вестн. Кольск. научн. центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 93.
25. Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 7. P. 1007.

Disturbances of the circulation of the lower and middle atmosphere, which can be caused by an isolated mountain array

I. V. Mingalev¹, K. G. Orlov¹, V. S. Mingalev^{1, *}

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: mingalev@pgia.ru*

Results of numerical simulation, devoted to the investigation of the influence of the Earth's relief on the circulation of the lower and middle atmosphere, are presented. The main attention is focused on the influence of an isolated mountain array on the circulation of the lower and middle atmosphere in the vicinity of this array. Mountains and rocks, covering the Kerguelen archipelago, are selected to be the isolated mountain array.