

А.В. Коваль, Н.М. Гаврилов

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОБЩУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ
СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ**

A.V. Koval, N.M. Gavrilov

**PARAMETRIZATION OF THE OROGRAPHIC WAVES
EFFECTS ON THE GENERAL CIRCULATION
OF THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE**

Получены поляризационные соотношения для стационарных орографических волн и формулы для расчета суммарного вертикального потока волновой энергии, а также вертикального профиля амплитуды колебаний горизонтальной скорости. Получены выражения для полного волнового потока тепла, а также для ускорений среднего потока и притоков тепла, создаваемых стационарными волновыми гармониками орографического происхождения. Разработанная параметризация стационарных орографических волн внедрена в модель общей циркуляции атмосферы МУАМ-48. Выполнены расчеты характеристик орографических волн, распространяющихся в атмосфере от поверхности Земли до высот нижней термосферы. Показано, что орографические волны могут оказывать существенное воздействие на циркуляцию и тепловой режим средней и верхней атмосферы.

Ключевые слова: средняя и верхняя атмосфера, стационарные планетарные волны, тепловой режим средней и верхней атмосферы.

Polarization relations for stationary orographic waves and formulae to calculate the total vertical wave energy flux, as well as vertical profile of amplitude of horizontal speed are obtained. Expressions for total wave heat flux, accelerations of the mean flow and heating rates produced by of stationary wave harmonics of orographic origin are derived. Calculations of orographic wave characteristics propagating in the atmosphere from the surface up to lower thermosphere are performed. It is shown that orographic waves may have a significant effect on the circulation and thermal structure of the middle and upper atmosphere.

Key words: the middle and upper atmosphere, stationary planetary waves, thermal structure of the middle and upper atmosphere.

Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) играют важную роль в формировании общей циркуляции, температурного режима и состава средней и верхней атмосферы. В последнее время в связи с численным моделированием общей циркуляции возрос интерес к изучению ускорений среднего потока и притоков тепла, создаваемых ВГВ. Интерпретация наблюдений внутренних гравитационных волн и включение эффектов ВГВ в численные атмосферные модели требуют развития простых численных схем, которые обеспечивают удовлетворительное описание волновых колебаний за минимальное компьютерное время. Одним из важных источников ВГВ является топография земной поверхности. На-

бегающий поток ветра взаимодействует с неоднородностями рельефа, в результате возникают стационарные гравитационные волны.

В разработанной нами параметризации орографии применялся метод Н.М. Гаврилова [1] использующий концепцию "подсеточной" топографии, которая учитывает изменения высоты земной поверхности с горизонтальными масштабами, меньшими, чем шаг сетки численной модели. В окрестности каждого узла сетки, следуя [2, 8], подсеточная орография характеризуется эллиптическим горным барьером. Сила, действующая на эллиптическую гору набегающим горизонтальным потоком скорости, рассчитана согласно статье [7].

В данном исследовании параметризация стационарных орографических волн внедрена в модель общей циркуляции атмосферы MUAM-48, уточнены поляризационные соотношения для стационарных орографических волн и получены формулы для расчета суммарного вертикального потока волновой энергии, а также вертикального профиля амплитуды колебаний горизонтальной скорости.

Динамическое и тепловое воздействие стационарных ВГВ

Согласно теории стационарных мезомасштабных возмущений, возникающих в атмосфере при обтекании гор стационарным набегающим потоком, эти возмущения можно отнести к классу внутренних гравитационных волн (ВГВ) с частотами $\sigma \rightarrow 0$ [4]. При распространении ВГВ в неоднородной вращающейся атмосфере с диссипацией возникает обмен энергии между средним потоком и волнами, а также нагрев атмосферы вследствие диссипации энергии ВГВ. Исследуем закономерности этих процессов для модели плоских ВГВ в атмосфере с учетом вращения Земли. Только при учете вращения планеты можно рассчитать вертикальные профили притоков тепла и волновые ускорения, вызванные стационарными гравитационными волнами.

Пользуясь стандартной теорией атмосферных волн в плоской вращающейся атмосфере [3, 5], получаем поляризационные соотношения для стационарных гравитационных волн с частотой $\sigma = 0$ и достаточно большими вертикальными волновыми числами и горизонтальными волновыми числами.

Используя эти соотношения и уравнение баланса волновой энергии (см. [6]), получаем выражения для суммарного переноса волновой энергии в случае стационарных волн, а также выражение для волнового ускорения и притоков тепла. Полученные формулы выражают волновые ускорения и притоки тепла через локальные, доступные измерению параметры гравитационных волн.

Численная схема и программа

Для параметризации мезомасштабной орографии в данной работе использована модификация метода, разработанного в [8]. Этот метод использует концепцию "подсеточной" орографии, которая включает изменения высоты земной поверхности с горизонтальными масштабами, меньшими, чем шаг горизонтальной сетки численной модели.

Обычно в численном моделировании циркуляции средней атмосферы используется разностная сетка по высоте. При практической реализации параметризация была включена в модель общей циркуляции MUAM-48. Рассчитанные профили волнового притока тепла интегрированы в уравнение притока тепла, а зональная и меридиональная составляющие вектора волнового ускорения вставлены в уравнения движения.

В связи с тем, что в приземном слое скорость ветра мала и образующиеся там гравитационные волны вносят малый вклад в формирование глобальной циркуляции, расчеты волновых притоков тепла и волновых ускорений проводились на высотах от 7 км. Далее рассчитываем вертикальный профиль амплитуд колебаний, волнового притока тепла и волнового ускорения в каждом узле сетки.

Горизонтальная сетка модели имеет 36 узлов вдоль меридианов и 64 узлов вдоль параллелей. Вертикальный профиль состоит из 48 точек, а шаг сетки равен 2,8 км, начиная с высоты 1,4 км. Вертикальные профили температуры и ветра берутся из модели MUAM.

Для расчета топографии использована база данных высот земной поверхности ETOPO2 с шагом в 2 мин вдоль широт и долгот. Задан экспоненциально растущий вертикальный профиль турбулентной и молекулярной вязкости.

Результаты

На рис. 1 и 2 показаны вертикальные профили амплитуды орографических волн, волнового притока тепла, модуля волнового ускорения, а также вертикального волнового числа, средней скорости ветра и температуры в различных географических пунктах. Рис. 1 соответствует высокогорной области Гималаев, а рис. 2 – равнинной местности. Можно видеть, что на рис. 1, *a* амплитуда растет до высот 75–80 км. Рис. 2, *a* демонстрирует резкое уменьшение амплитуды выше 20–25 км. Такое разное поведение волн можно объяснить разницей в их масштабах: в первом случае вертикальная длина волны больше, чем во втором. Это демонстрируют и рис. 1, *z* и 2, *z*, изображающие профиль вертикального волнового числа. На рис. 1, *z* волновое число на несколько порядков меньше, чем на рис. 2, *z*.

Рис. 3 и 4 отражают амплитуды колебаний стационарных ВГВ на высотах 7 и 80 км – на уровне максимума амплитуды. Очевидно, что зоны возникновения колебаний на поверхности соответствуют географическому расположению горных массивов. Вертикальный профиль амплитуды орографических волн сильно зависит от профиля турбулентной и молекулярной вязкости и теплопроводности. При малой диссипации вблизи поверхности амплитуды орографических волн экспоненциально растут с высотой. Далее, с ростом высоты возрастающие вязкость и теплопроводность отфильтровывают более высокочастотные орографические волны. Таким образом, выше 60–70 км существенные амплитуды наблюдаются только над отдельными точками. В средних и высоких широтах зимнего (Северного) полушария амплитуды орографических волн в средней и верхней атмосфере часто оказываются большими, чем на аналогичных шירו-

тах летнего (Южного) полушария. Это, возможно, связано с более благоприятными условиями распространения волн в зимних структурах температуры и ветра по сравнению с летними.

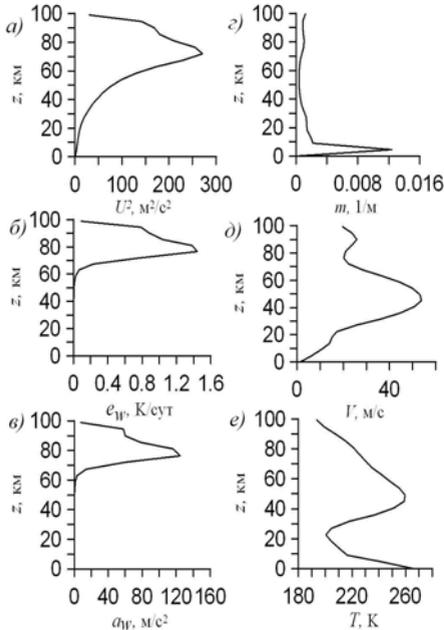


Рис. 1. Рассчитанные вертикальные профили квадрата амплитуды волны.

a – волнового притока тепла; *б* – модуля волнового ускорения; *в* – вертикального волнового числа *z* – фоновой скорости ветра; *д* – и температуры; *е* – на широте 32,5° с.ш. и долготе 90° в.д. в январе

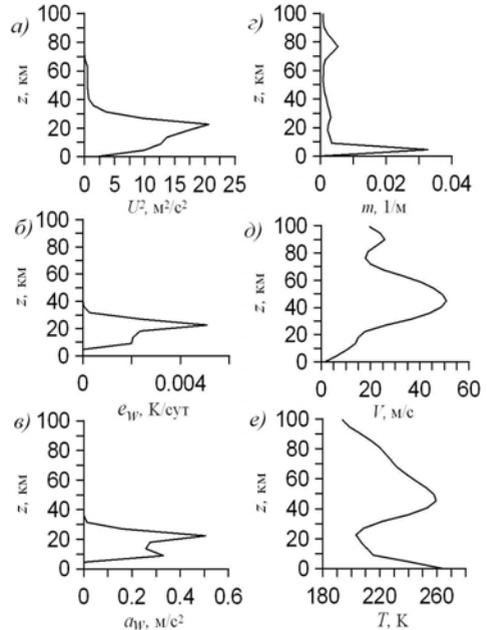


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для широты 27,5° с.ш. и долготы 84,4° в.д.

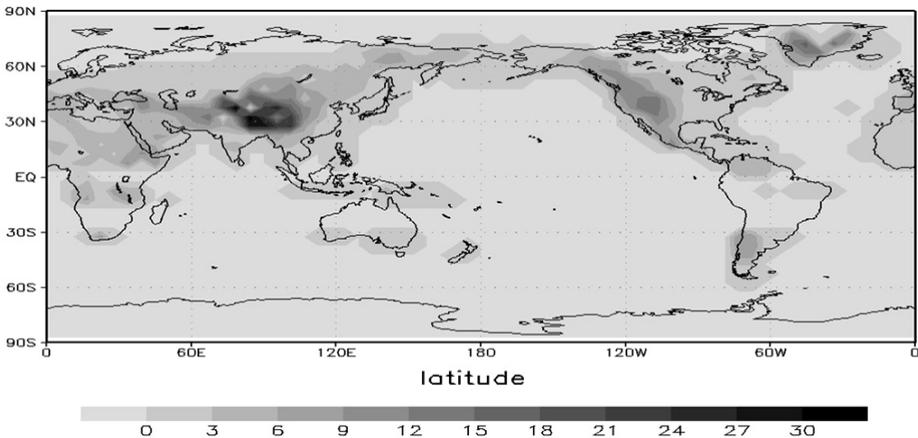


Рис. 3. Амплитуда волновых колебаний стационарных волн на высоте 7 км, м/с. Зоны возникновения колебаний соответствуют географическому расположению горных массивов

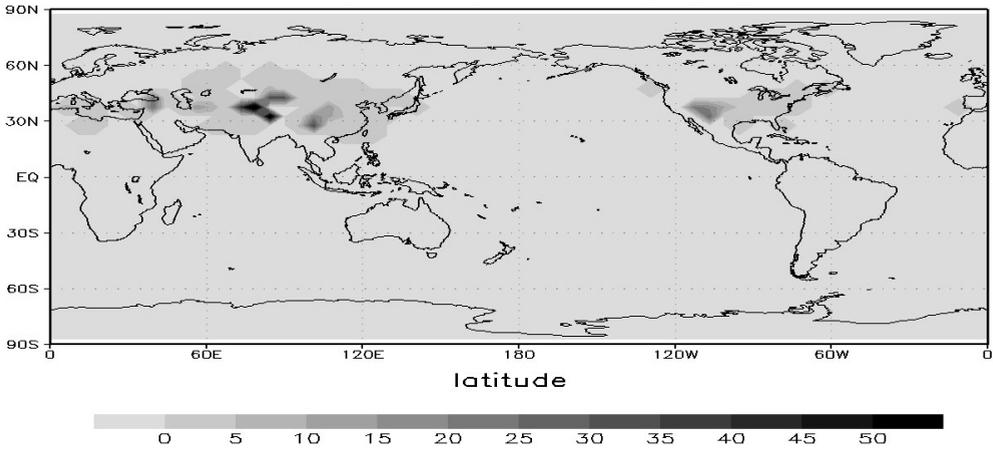


Рис.4. Амплитуда волновых колебаний стационарных волн на высоте 80 км, м/с. С ростом высоты возрастающие вязкость и теплопроводность отфильтровывают более высокочастотные орографические волны, причем выше 60–70 км существенные амплитуды наблюдаются только над отдельными точками

Вертикальный поток волновой энергии, а также волновые ускорения среднего потока и притоки тепла имеют пространственные распределения, аналогичные распределениям амплитуд волн.

Литература

1. Гаврилов Н.М. Параметризация динамического и теплового воздействия установившихся внутренних гравитационных волн на среднюю атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 1989, т. 25, № 3, с. 271-278.
2. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
3. Fritts D.C., and Lu W. Spectral Estimates of Gravity Wave Energy and Momentum Fluxes. Part II: Parameterization of Wave Forcing and Variability // J. Atmospheric Sci., 1993, p. 3695-3713.
4. Gavriloв N.M. On the generation of internal gravity waves in the atmosphere by mesoscale turbulence. – М.: Hydrometeoizdat Press, 1988, p. 74-77.
5. Hines, C.O. A Modeling of Atmospheric Gravity Waves and Wave Drag Generated by Isotropic and Anisotropic Terrain // J. Atmospheric Sci., 1988, vol. 45, p. 309-322.
6. Lott F., Miller M.J. A new subgrid-scale orographic drag parameterization: Its formulation and testing // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1997, vol. 123, p. 101-127.
7. Phillips D.S. Analytical Surface Pressure and Drag for Linear Hydrostatic Flow over Three-Dimensional Elliptical Mountains // J. Atmospheric Sci., 1984, vol. 41, p. 1073-1084.
8. Scinocca J.F., McFarlane N.A. The parameterization of drag induced by stratified flow over anisotropic orography // Quart. J. Meteorol. Soc., 2000, vol. 126, No. 568, p. 2353-2393.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0742).