

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ ТРОПОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ

^{1,2}Ю.А. Курдяева, ²С.П. Кшевецкий, ^{3,4}С.Н. Куличков, ¹О.П. Борчевкина

¹Калининградское отделение института земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия
yakurdyeva@gmail.com

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

STUDYING PROPAGATION OF ACOUSTIC-GRAVITY WAVES IN THE UPPER ATMOSPHERE

Yu.A. Kurdyeva¹, S.P. Kshevetskii², S.N. Kulichkov^{3,4}, O.P. Borchevkina¹

¹KB Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia
yakurdyeva@gmail.com

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. По данным измерений четырех микробарографов построено поле вариаций давления. Решена трехмерная гидродинамическая начально-краевая задача о распространении волн от наблюдаемых волновых вариаций давления на поверхности Земли. Получены оценки амплитуды температурных возмущений в верхней атмосфере, вызванных акустико-гравитационными волнами от распространяющегося атмосферного фронта. Численными расчетами установлено, что в создаваемых волновых возмущениях в верхней атмосфере лидирующая роль принадлежит инфразвуку.

Ключевые слова: численное моделирование, атмосфера, акустико-гравитационные волны, конвективные неустойчивости.

Abstract. According to the measurement data of 4 microbarographs a pressure variation field was constructed. The three-dimensional hydrodynamic initial-boundary problem of wave propagation from the observed wave pressure variations on the Earth's surface has been solved. Estimates of the amplitude of temperature disturbances in the upper atmosphere caused by acoustic-gravity waves propagating from atmospheric front are obtained. Numerical calculations have shown the leading role in the created wave disturbances in the upper atmosphere belongs to the infrasound.

Keywords: numerical simulation, atmosphere, acoustic-gravity waves, convective instabilities.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) на высотах тропосферы являются конвективные неустойчивости, возникновение которых сопровождается образованием и эволюцией облаков. Спектр и пространственно-временная картина модельных расчетов волн, распространяющихся из нижней атмосферы в верхнюю, хорошо согласуются с наблюдениями [Fovell et al., 1992; Miller, 1999; Кшевецкий, Куличков, 2015]. Однако амплитуды генерируемых АГВ сложно оценить на основе численных расчетов вследствие недостатка детальной информации о тропосферных источниках [Snively, Pasko, 2003]. Оценка амплитуд атмосферных волн, приходящих в верхнюю атмосферу от тропосферных источников, необходима не только для изучения этих волн, но и для изучения влияния этих волн на параметры верхней атмосферы на различных высотных уровнях.

Для исследования амплитуд генерируемых АГВ в качестве нижнего граничного условия в численных расчетах предлагается использовать вариации давления у поверхности Земли, ассоциированные с метеорологическими событиями. Математическое исследование такой нестандартной краевой задачи было произведено в [Kurdyeva et al., 2018]. Поле вариаций давления построено на основе данных наблю-

дений вариаций атмосферного давления в 2016 г., полученных на 4 микробарографах ИФА им. А.М. Обухова РАН. Все микробарографы расположены в московском регионе

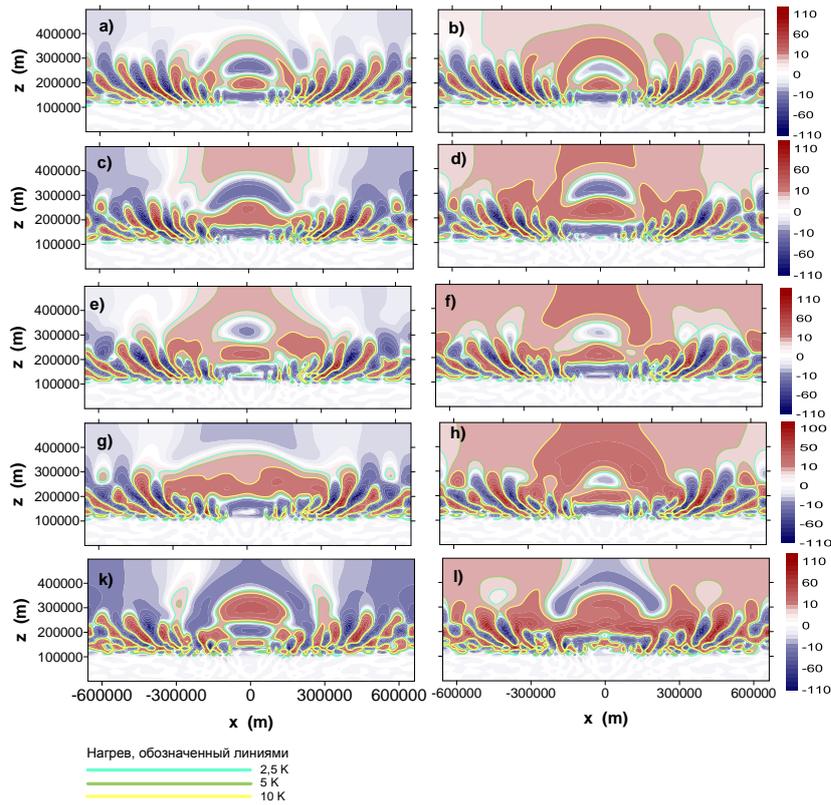
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования была использована трехмерная суперкомпьютерная модель «AtmoSym», разработанная С.П. Кшевецким и Н.М. Гавриловым [Kshevetskii, 2001b; Kshevetskii, 2002; Kshevetskii, Gavrilov, 2005]. Модель позволяет решать широкий спектр задач о распространении волн от различных начальных возмущений и источников волн в диапазоне высот 0–500 км над территорией с горизонтальным масштабом до нескольких тысяч километров. «AtmoSym» не использует квазигидростатическое приближение.

Поскольку нас интересуют только волны, созданные колебаниями давления на нижней границе расчетной области, то начальными условиями являются условия (1)

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t=0)=0, v(x, y, z, t=0)=0, w(x, y, z, t=0)=0, \\ \rho(x, y, z, t=0)=\rho_0(z), T(x, y, z, t=0)=T_0(z). \end{aligned} \quad (1)$$

Верхняя граница находится на высоте $h=500$ км. Верхние граничные условия традиционны для моделей термосферы и соответствуют отсутствию волн



Сечение поля возмущений температуры $t=1$ ч 50 мин, 1 ч 59 мин, 2 ч 11 мин, 2 ч 14 мин, 2 ч 31 мин, соответственно. Расчеты выполнены с граничными условиями — a, c, e, f, g, k , расчеты выполнены не периодическими граничными условиями — b, d, f, g, l

в начальный момент времени. Граничные условия на горизонтальных границах периодические. Условия на нижней границе имеют специальный вид:

$$u(x, y, z=0, t) = 0, v(x, y, z=0, t) = 0,$$

$$\frac{w(x, y, z, t=0)}{dz} = 0,$$

$$T(x, y, z, t=0) = T_0(0),$$

$$P(x, y, z=0, t) = P_0(0) + f_p(x, y, z=0, t) \quad (2)$$

где $f_p(x, y, z=0, t)$ — функция, описывающая волновые вариации поля давления и определяемая эмпирически на основе экспериментальных наблюдений, а $P_0(0)$ — давление на поверхности Земли.

Результирующее поле вариаций атмосферного давления получается суммированием отдельных полей, соответствующих вариациям давления в окрестности каждого из четырех микробарографов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Волны создаются совокупностью четырех граничных источников у поверхности Земли, и волновое поле вблизи источников несимметрично. Однако по мере удаления волн от источников, генерируемые различными источниками волны интерферируют таким образом, что волновое поле приобретает вид волнового поля от некоторого единого точечного источника. Это наблюдение привело к идее использования в расчетах необычных неперидических граничных условий, где вертикальные и горизонтальные скорости заданы ассиметрично. Такие гра-

ничные условия ранее не никем не использовались. Таким образом, были проведены расчеты для двух задач с различными горизонтальными граничными условиями (рисунок).

Левая панель рисунка соответствует расчетам с периодическими граничными условиями. Такие периодические условия должны приводить к отражению волн от горизонтальных границ. Однако мы не видим в верхней атмосфере хорошо знакомой картины отражения волн, вероятно, потому что источник волн расположен внизу у поверхности Земли и отраженные волны распространяются назад-вверх, а не просто назад. Кроме этого, в верхней атмосфере очень велика роль вязкости и теплопроводности, что делает картину отражения волн нечеткой.

На правой панели рисунка мы видим обширные нагретые области атмосферы, т. е. нагрев среды волнами, в то время как в левой колонке нагрева волнами нет. Различие очевидно связано с отличием граничных условий по горизонтали в расчетах. Нагрев среды волнами на правых графиках рисунка не является неустойчивостью задачи неперидическими граничными условиями, поскольку он возникает не на горизонтальных границах расчетной области, а в ее центре, и распространяется к границам. Кроме этого, неустойчивости нарастают, в то время как нагрев на графиках правой колонки рисунка достиг некоторого порога (примерно 15 К в области шириной 500 км и 5 К в области шириной 1000 км над источником волн), и температура стабилизировалась.

Нагретая область ведет себя как волновое возмущение и временами температура газа в нагретой

области может падать, оставаясь, однако, выше фоновой. Эти особенности указывают, что появление нагретой области выше 300 км, изображенной в правой колонке рисунка, вероятно связано с приходом очень длинных акустических (инфразвуковых) волн. С ростом высоты роль вязкости и теплопроводности быстро растет, и короткие волны не могут существовать на высотах порядка 300 км и выше. Однако мы знаем, что акустические волны быстро распространяются и возникновение нагретой области спустя большое время после включения источников волн требует объяснения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислено волновое поле в верхней атмосфере от наблюдаемых приземных вариаций давления. Расчеты показали, что в течение первых двух с половиной часов верхнюю атмосферу достигают в основном инфразвуковые волны. Амплитуда температурных волновых возмущений в верхней атмосфере примерно 100 К. Кроме этого, в верхней атмосфере спустя примерно два часа над источником формируется нагретая область шириной примерно 500 км, температура в которой превышает фоновую примерно на 10–15 К. Эта нагретая область погружена в нагретую область шириной 1000 км, с температурой, превышающей фоновую на 5 К. Вероятно, нагретые области образованы очень длинными инфразвуковыми волнами, которые распространяются вверх очень медленно в силу свойств длинных волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00574 и №18-05-00184). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кшевецкий С.П., Куличков С.Н. Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 52–59.
- Fovell R., Durran D., Holton J.R. Numerical simulation of convectively generated stratospheric gravity waves // J. Atmos. Sci. 1992. V. 49, N 16. P. 1427–1442.
- Miller D.V. Thunderstorm induced gravity waves as a potential hazard to commercial aircraft // Presented at the American Meteorological Society 79th Annual conference, American Meteorological Society. 1999.
- Snively J.B., Pasko V.B. Breaking of thunderstorm-generated gravity waves as a source of short-period ducted waves at mesopause altitudes. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 24. P. 2254. DOI: [10.1029/2003GL018436](https://doi.org/10.1029/2003GL018436).
- Kshevetskii S.P. Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves // Nonlinear Process. Geophys. 2001b. V. 8. P. 37–53.
- Kshevetskii S.P. Internal gravity waves in nonexponentially density-stratified fluids // Comp. Math. Phys. 2002. V. 42, N 10. P. 1510–1521.
- Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M. Vertical propagation, breaking, and effects of nonlinear gravity waves in the atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 1014–1030.
- Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., et al. Correct Boundary Conditions for the High-Resolution Model of Nonlinear Acoustic-Gravity Waves Forced by Atmospheric Pressure Variations // Pure Appl. Geophys. 2018. V. 175. P. 3639–3652. DOI: [10.1007/s00024-018-1906-x](https://doi.org/10.1007/s00024-018-1906-x).