

ВЛИЯНИЕ ФОНОВОГО ВЕТРА НА ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

^{1,2}Ю.А. Курдяева, ^{1,2}И.В. Карпов, ³С.П. Кшевецкий

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы 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

INFLUENCE OF THE BACKGROUND WIND ON WAVE DISTURBANCES IN THE UPPER ATMOSPHERE

^{1,2}Yu.A. Kurdyeva, ^{1,2}I.V. Karpov, ³S.P. Kshevetskii

¹Kaliningrad Branch of Pushkov 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

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования распространения в термосферу внутренних гравитационных волн (ВГВ), возбуждаемых в тропосфере, с учетом нейтрального ветра. Показано, что ветер на термосферных высотах существенно влияет на амплитуды и пространственные масштабы волновых возмущений. Это влияние проявляется в повышении амплитуд и уменьшении пространственных масштабов волн, распространяющихся против термосферного ветра. На высотах нижней термосферы влияние ветра приводит к образованию волновода Доплера и волноводному распространению ВГВ на этих высотах. На больших высотах возможно формирование волноводной области, обусловленной изменением температуры с высотой.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, термосфера, фоновый ветер.

Abstract. We present the results of numerical simulation of the propagation of internal gravity waves (IGWs) generated in the troposphere into the thermosphere, taking into account the neutral wind. It is shown that the wind at thermospheric heights significantly affects the amplitudes and spatial scales of wave disturbances. This influence appears as an increase in the amplitudes and a decrease in the spatial scales of waves propagating against the thermospheric wind. Doppler waveguide forms at the heights of the lower thermosphere, which leads to waveguide propagation of IGWs at these heights. At high altitudes, the formation of a waveguide region is possible due to the change in temperature with height.

Keywords: internal gravity waves, thermosphere, background wind.

ВВЕДЕНИЕ

Акустические и внутренние гравитационные волны (ВГВ), возбуждаемые на тропосферных высотах, переносят значительное количество энергии в верхнюю атмосферу и являются важным элементом атмосферной динамики. При вертикальном распространении волн из тропосферы в термосферу, помимо стратификации, значительное влияние оказывают ветра. Фоновые ветровые структуры влияют на атмосферные волны и характер их проникновения в атмосферу и ионосферу, а также на амплитуды и пространственные масштабы волновых возмущений. В работе [Waldock, Jones, 1986] отмечается, что ветра в нижней атмосфере могут оказывать большое влияние на характеристики волновых возмущений на термосферных высотах.

Энергетически мощным источником атмосферных волн в тропосфере являются различные метеорологические события. В работах [Курдяева и др., 2019; Borchevskina et al., 2021] были исследованы особенности распространения волн от таких источников, но без учета фонового ветра. Численное исследование распространения ВГВ, генерируемых локальным тепловым источником небольшого размера с учетом фонового ветра, проведенное в данной работе, позволит более детально изучить эффекты, вызванные взаимодействием на разных высотах атмосферных волн и нейтрального ветра.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Численное исследование проведено с применением двумерной версии модели нейтральной атмосферы высокого пространственного и временного разрешения AtmoSym. Модель основана на решении нелинейных негидростатических гидродинамических уравнений, что позволяет описывать процессы распространения в атмосфере как акустических волн, так и ВГВ. Применяемые в модели численные методы интегрирования уравнений подробно описаны в работах [Kshevetskii, 2001a, b]. Фоновая атмосфера задается на основе эмпирической модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Горизонтальный ветер рассчитан с применением эмпирической модели горизонтального ветра HWM [Drob et al., 2015] для зимней среднеширотной атмосферы.

Расчеты вызванных распространением ВГВ из тропосферы возмущений атмосферных параметров были проведены для случаев отсутствия ветра в атмосфере и с его учетом. В экспериментах тропосферные ВГВ возбуждались локальными тепловыми монохроматическими источниками, аппроксимированными гауссовой функцией, с периодами колебаний 15 или 30 мин. Периоды источников были определены в соответствии с уже существующими экспериментальными исследованиями [Polyakova, Perevalova, 2013; Borchevskina et al., 2021]. Центр источника находится в центре расчетной области.

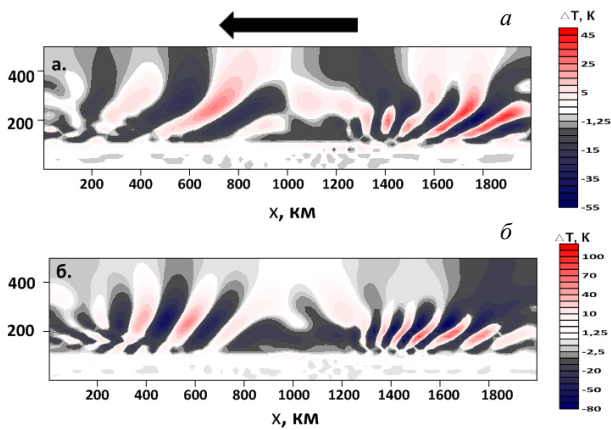


Рис. 1. Распределение волновой добавки к температуре при действии тропосферного источника тепла с периодами 30 (а) и 15 мин (б) с учетом нейтрального ветра. Стрелкой обозначено направление ветра в термосфере

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета волновой картины (рис. 1) через 2 ч после включения тропосферного теплового источника показали, что возникающая пространственная структура возмущений носит квазиволноводный характер. На высотах выше 200 км наблюдается уменьшение амплитуды возмущений, распространяющихся в направлении термосферного ветра, и увеличение их горизонтальных масштабов по сравнению с безветренным случаем. Квазиволноводный характер возмущений на этой высоте обусловлен вертикальной структурой температуры.

На рис. 2 показана пространственная картина разности амплитуд термосферных возмущений (см. рис. 1), полученных в обоих вариантах расчетов. В нижней термосфере, где изменения ветра значительны, возмущения с небольшими пространственными масштабами также проявляют волноводный характер распространения. Такой эффект можно связать с образованием волновода Доплера [Dong et al., 2021].

Обратимся к дисперсионному соотношению, которое определяет затухание волн при волноводном распространении

$$m^2 = k^2 \left(\frac{N^2}{(\omega - kU)^2} - 1 \right), \quad (1)$$

где m , k — вертикальное и горизонтальное волновые числа; U — горизонтальная компонента термосферного ветра; N — частота Вайсяля—Брента. Положительные значения m^2 соответствуют волнам, распространяющимся по вертикали, отрицательные — затухающим волнам. Частотные характеристики волн, захватываемых в волновод, определяются скоростью ветра и горизонтальной компонентой волнового вектора. Так, для волн, распространяющихся против ветра, m^2 будет уменьшаться и может стать отрицательным. Это будет соответствовать затуханию волн в вертикальном направлении. Из соотношения (1) следует также, что термосферный ветер в большей мере будет влиять на распространение мелко- и среднемасштабных волн с небольшими, по сравнению со скоростью ветра, фазовыми скоростями.

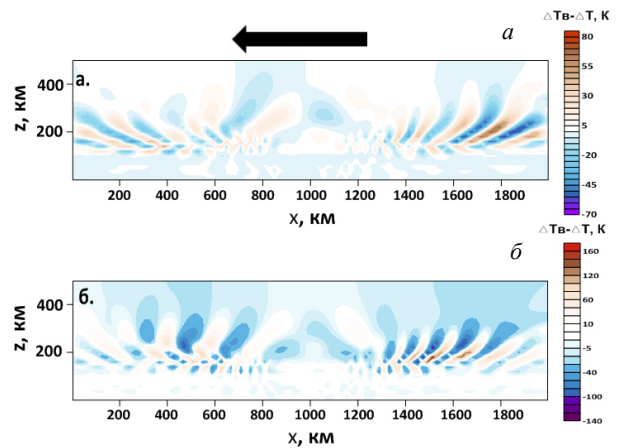


Рис. 2. Разность между вариациями температуры с учетом ветра и без его учета при действии тропосферного источника тепла с периодами 30 (а) и 15 мин (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что распространение атмосферных волн с малыми пространственными масштабами в нижней термосфере носит волноводный характер, который определяется ветровым режимом. В верхней атмосфере наблюдается квазиволноводный характер возмущений, обусловленный вертикальной структурой температуры. В верхней термосфере наблюдается повышение амплитуд и уменьшение пространственных масштабов возмущений, распространяющихся против термосферного ветра. Для волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра, наблюдается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов. Асимметричный характер возмущений относительно расположения источника в тропосфере объясняется дисперсионным соотношением.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00208.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Курдяева Ю.А., Куличков С.Н., Кшевецкий С.П. и др. Вертикальное распространение акустико-гравитационных волн от атмосферных фронтов в верхнюю атмосферу. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 4. С. 3–12.
- Borchevskina O.P., Kurdyayeva Y.A., Karпов I.V., et al. Disturbances of the thermosphere and the ionosphere during a meteorological storm. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, no. 11. P. 1384.
- Dong W., Hickey M.P., Zhang S. A numerical study of gravity waves propagation characteristics in the mesospheric Doppler duct. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021. Vol. 126, e2021JD034680. DOI: [10.1029/2021JD034680](https://doi.org/10.1029/2021JD034680).
- Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. *Earth and Space Sci.* 2015. Vol. 2. P. 301–319.
- Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2001a. Vol. 41, no. 2. P. 273–288.
- Kshevetskii S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2001b. Vol. 41. P. 1777–1791.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., et al. NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A12. P. 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the north-

west Pacific Ocean. *Adv. Space Res.* 2013. Vol. 52, no. 8. P. 1416–1426.

Waldock J.A., Jones T.B. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1986. Vol. 48, no. 3. P. 245–260.