

УДК 551.51:551.55

РАСПРОСТРАНЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ТРОПОСФЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, В ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ С УЧЕТОМ ФОНОВОГО ВЕТРА

© 2022 г. Ю. А. Курдяева¹ *, С. П. Кшевецкий²

¹Калининградский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Балтийский федеральный университет имени И. Канта”, Калининград, Россия

*E-mail: yakurdyeva@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Численно исследовано влияния фонового ветра на динамические процессы в атмосфере, вызванные распространением волн различных периодов от локальных тепловых тропосферных источников, с применением численной региональной модели атмосферы высокого разрешения “AtmoSym”. Рассчитаны вариации поля температуры, вызванные вертикальным распространением акустических и внутренних гравитационных волн, и изучены эффекты, наблюдаемые в термосфере.

DOI: 10.31857/S0367676522030140

ВВЕДЕНИЕ

Исследования динамических процессов в верхней атмосфере, вызванных распространением атмосферных волн, генерируемых в тропосфере, на сегодняшний день получили сильное развитие, которое обусловлено значительным улучшением методов дистанционного зондирования Земли и методов численного моделирования. Источники таких волн разнообразны, например, мезомасштабная турбулентность, конвективные тропосферные источники [1, 2], орография [3], землетрясения [4, 5] и другие. Атмосферные волны, распространяясь вертикально и диссипируя, значительно влияют на состояние термосферы и могут являться источником возникновения локальных областей нагрева в области диссипации [6–9]. Помимо особенностей строения атмосферы, важную роль в формировании широкого спектра волновых возмущений играют фоновый ветер и процессы молекулярной вязкости и теплопроводности [10]. Это особенно важно при рассмотрении волновых возмущений в ионосфере, что подтверждают экспериментальные исследования [11, 12], где показано, что на распространение внутренних гравитационных волн (ВГВ) на высотах нижней термосферы и F-области ионосферы нейтральный ветер оказывает фильтрующее воздействие. Такие волны могут быть источником перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), на направление

распространения которых значительное влияние оказывает нейтральный ветер.

Детально изучить атмосферные эффекты, вызванные взаимодействием акустических, внутренних гравитационных волн и нейтрального ветра, позволяют методы численного моделирования. Однако не все атмосферные модели позволяют качественно моделировать волновые процессы различных масштабов на высотах от тропосферы до верхней термосферы. Климатические модели часто работают на атмосферных высотах до 250–300 км, в то время как нижняя граница глобальных исследовательских моделей может не включать тропосферные высоты. В данном исследовании для расчетов применяется региональная нелинейная модель высокого разрешения “AtmoSym” [13, 14]. Она работает в диапазоне высот от нуля до 500 км, что дает возможность детально изучить влияние вертикального распространения атмосферных волн, генерируемых в тропосфере, на различные атмосферные слои, включая верхнюю термосферу. “AtmoSym” является негидростатической моделью и обладает высоким разрешением по времени (~0.1 с) и пространству (вертикальный шаг сетки ~500 м), что позволяет исследовать широкий спектр атмосферных волн. Также при моделировании вертикального распространения волн из нижней в верхнюю атмосферу важно не только работать на больших вертикальных масштабах, но и учитывать реальную стратификацию атмосферы. Плотность газа с высотой сильно падает, и

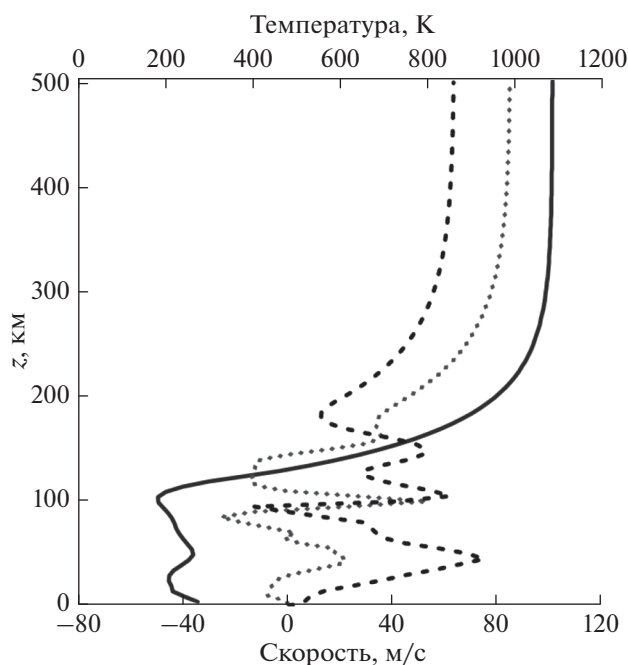


Рис. 1. Вертикальные профили фоновых температуры (серая сплошная линия), меридиональной компоненты ветра (серая пунктирная линия), зональной компоненты ветра (черная пунктирная линия).

амплитуда волн увеличивается, что приводит к сильной нелинейности процессов, таких как, например, нагрев газа и генерация течений волнами, на больших высотах. Данная модель, в отличие от некоторых других атмосферных моделей, учитывает реальную стратификацию, нелинейные и диссипативные процессы разных масштабов, так как не использует приближение гидростатики и описывает образование ударных волн и генерацию турбулентностей. Вышеописанные характеристики модели обуславливают ее применение для изучения взаимодействия акустических волн и ВГВ с нейтральным ветром.

В настоящей работе обсуждаются результаты численного моделирования распространения атмосферных волн от теплового монохроматического источника в тропосфере, работающего на разных частотах, с учетом нейтрального ветра, построенного при помощи эмпирической модели NWM [15]. Показано, что эффекты, вызванные взаимодействием волн разных периодов с нейтральным ветром, различны на высотах более 100 км. Ветер значительно влияет на распространение волн с периодами ВГВ. Также ВГВ, генерируемые метеорологическими событиями, могут быть источником появления среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений. Для более высокочастотной части спектра характерны эффекты взаимодействия ветра с вторично и побочно генерируемыми волнами.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА

Энергетически мощным источником АГВ являются процессы выделения/поглощения тепла при фазовых переходах воды в атмосфере при образовании и эволюции облаков [16, 17] и формировании других метеорологических явлений. Нагрев атмосферы конвективным тепловыделением может приводить атмосферный газ в движение, что влечет за собой нарушение статической устойчивости атмосферы с последующим развитием неустойчивых процессов. Метеорологические события разной силы – удобный объект для исследования вертикального распространения волн.

В численном исследовании для изучения эффектов, вызванных волнами разных периодов, генерируемых метеорологическими событиями, применяется модель “AtmoSym”, описанная выше. Поведение параметров нейтральной атмосферы в модели определяется двумерной системой гидродинамических уравнений для вязкого теплопроводного идеального газа, описанных в [18]. Методы решения уравнений модели описаны в [13, 14]. Зависимость параметров среды (коэффициентов вязкости и теплопроводности, фоновых плотности, температуры и давления) от высоты берется из эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 [19].

Для расчета волн задается локальный тепловой монохроматический тропосферный источник сравнительно небольшого размера. Небольшие размеры модельного источника связаны с тем, что практически любой произвольный тепловой источник сложной формы можно представить в виде суммы локальных небольших источников. Такой источник можно аппроксимировать гауссовой функцией:

$$f(x, z, t) = \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{D_x}\right)^2 - \left(\frac{z-z_0}{D_z}\right)^2\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \times \sin(\omega t), \quad (1)$$

где параметр x_0 и z_0 определяют центр источника в расчетной области в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. Параметры D_x и D_z определяют размеры источника, параметр τ введен для медленного включения источника, чтобы подавить возможные переходные процессы. Расчетная область имеет вертикальный масштаб 500 км и горизонтальный – 2000 км. Расчеты проводились для одних и тех же источников для безветренной атмосферы и атмосферы с учетом нейтрального ветра, полученного с применением модели NWM [15]. Вертикальные профили ветра и температуры показаны на рис. 1.

Начальные условия соответствуют отсутствию волн в начальный момент времени. На горизонтальных границах расчетной области применяются периодические граничные условия. Верхние

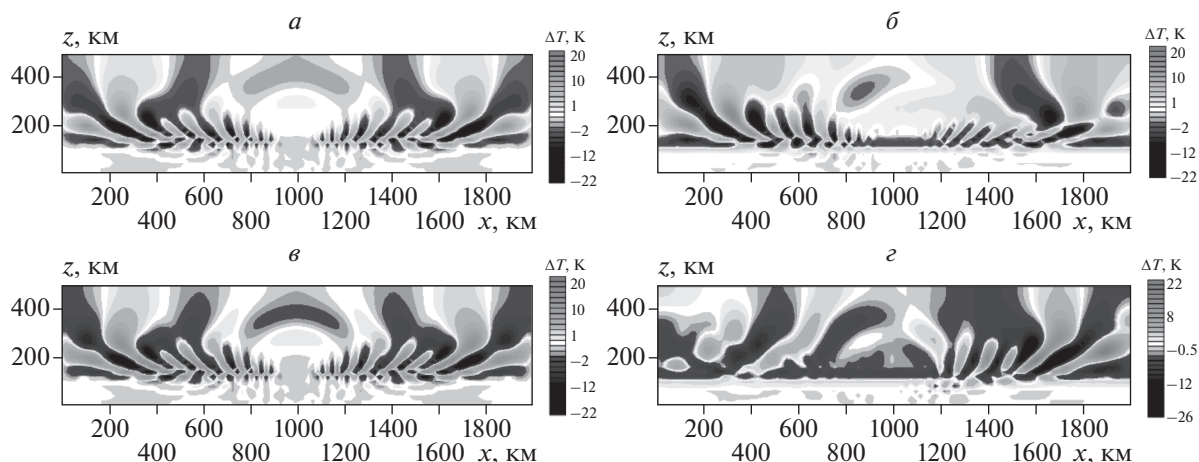


Рис. 2. Вариации поля температуры в результате работы источника с частотой $\omega = \frac{2\pi}{1800\text{ с}}$ для времени $t = 1.6\text{ ч}$: для безветренной атмосферы с разными температурными профилями (*а*, *б*); для атмосферы с разными температурными профилям с учетом работы фонового ветра (*б*, *г*).

граничные условия являются условиями не протекания и традиционны для моделей термосферы. Нижние граничные условия в задаче о распространении волн от тропосферного источника $f(x, z, t)$ стандартны для задач диссипативной модели атмосферы и имеют вид

$$\begin{aligned} U(x, z = 0, t) = 0, \quad W(x, z = 0, t) = 0, \\ T(x, z = 0, t) = T_0(0). \end{aligned} \quad (2)$$

Расчеты проводились для источника $f(x, z, t)$, работающего на частотах $\omega = 2\pi/T$, где $T = 30, 300, 900, 1800\text{ с}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов распространения внутренних гравитационных волн с периодами 15 и 30 мин показывают, что их взаимодействие с нейтральным ветром оказывает значительное влияние на формирование итоговой волновой картины. Симметричное распространение волн от одного локального источника в двумерном расчете позволяет качественно оценить связь с ветром. На результирующей картине половина волн всегда будет распространяться в одном направлении с нейтральным ветром, при этом ровно такая же часть будет распространяться в противоположном направлении. На рис. 2 показаны вариации поля температуры для двух различных вертикальных профилей температуры и ветра. Рисунок 2б построен для атмосферы с учетом нейтрального ветра, где ветер в термосфере сонаправлен с осью Ox . Рисунок 2г построен для ветра, направленного в противоположную сторону по отношению к рис. 1б. Видно, что структура волновой картины на рисунках в частях, где распространение волн коллинеарно с ветром, выражена менее ярко,

чем в этой же части, но для безветренного случая (рис. 2а, 2в). При этом амплитуды волн в сонаправленной части сильно меньше по сравнению с результатом для безветренной атмосферы, в то время как в противоположной амплитуда выше. Такие особенности проявляются в одинаковой степени для источника, работающего на частоте $\omega = \frac{2\pi}{900\text{ с}}$, и для источника, работающего на ча-

стоте $\omega = \frac{2\pi}{1800\text{ с}}$. В работе [12] при исследовании взаимодействия ВГВ с нейтральным ветром с использованием накопленных данных о перемещающихся ионосферных возмущениях было показано, что амплитуда возмущений на высотах 90–250 км изменяется в зависимости от направления нейтрального ветра. Это может быть объяснено механизмом ветровой фильтрации. Полученный в данной работе результат для нейтральной атмосферы согласуется с наблюдениями в ионосфере в [12]. Поэтому можно установить связь между распространением волн, генерируемых тепловым источником в тропосфере, с периодами ВГВ и появлением среднemasштабных ПИВ. Таким образом, можно рассматривать процессы конвекции как одни из механизмов появления ПИВ в ионосфере, что подтверждается экспериментальными исследованиями [20–22].

Генерируемые модельным источником инфразвуковые волны $\left(\omega = \frac{2\pi}{30\text{ с}}\right)$ распространяются в атмосфере практически вертикально. Ветер на их структуру и амплитуду оказывает незначительное влияние. Однако с течением времени в термосфере наблюдаются вариации волнового харак-

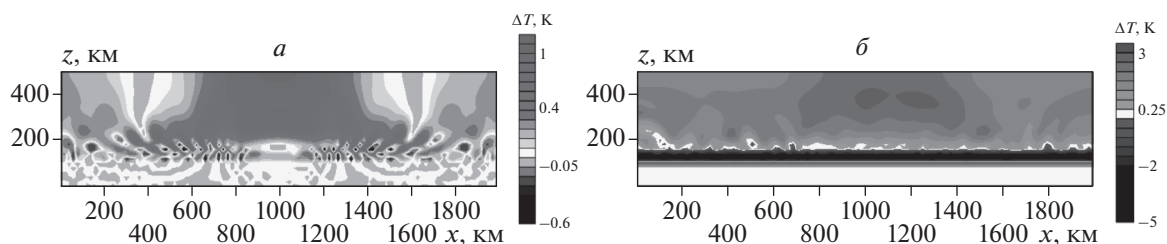


Рис. 3. Вариации поля температуры в результате работы источника с частотой $\omega = \frac{2\pi}{30\text{с}}$ для времени $t = 2.15$ ч: для безветренной атмосферы (а); с учетом работы фонового ветра (б).

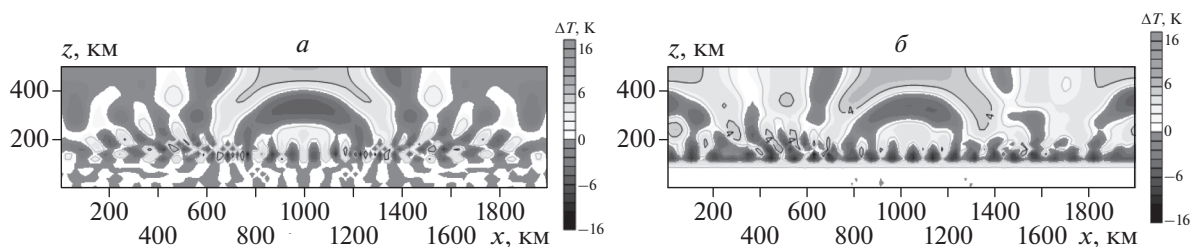


Рис. 4. Вариации поля температуры в результате работы источника с частотой $\omega = \frac{2\pi}{300\text{с}}$ для времени $t = 2.3$ ч: для безветренной атмосферы (а); с учетом работы фонового ветра (б). Линиями на изображениях обозначены области нагрева.

тера с характерными горизонтальными масштабами более 100 км (рис. 3б). Объясняется появление таких вариаций образованием нагретой области вследствие вертикального распространения инфразвука. Существование такой области отмечено в работе [23]. Такая область существует продолжительное время, и сама может являться источником вторичных волн, которые распространяются во всех направлениях. При этом спектр вторичных волн может быть разнообразен и если он содержит ВГВ, то на них, как рассмотрено выше, нейтральный ветер может оказывать фильтрующее воздействие, сопровождаемое увеличением амплитуды новых вариаций. Другой причиной проявления такого эффекта может быть генерация побочных внутренних гравитационных волн при генерации акустических волн тепловым тропосферным источником. Эти волны генерируются тепловым источником всегда в паре, так как такой источник локально изменяет лишь температуру, в то время как для возникновения волны необходимо обеспечить согласованное колебание плотности. Генерируемые в этом случае побочные гравитационные волны существуют в атмосфере, но начинают проявлять себя позже и на их распространение и структуру также влияет нейтральный ветер.

Для волн с периодом 5 мин на временах, превышающих время работы источника, общая волновая картина для безветренного расчета и расчета с учетом нейтрального ветра сохраняется (рис. 4). Однако различия, носящие волновой характер, присутствуют и проявляются в образовании крупномасштабных областей в термосфере. При этом среднемасштабные возмущения в области турбо-

паузы, которые становятся менее явными после окончания работы тропосферного источника в безветренном случае, усиливаются и существуют более продолжительное время при работе нейтрального. Распространение волн с частотами, близкими к частоте акустической отсечки и Вьяйсяля–Брента, носит сложный характер. Теоретические исследования показали, что в неизотермической атмосфере обычно все волновые моды, относящиеся к низкочастотной общей спектральной ветви акустико-гравитационных волн, обладают свойствами гравитационных волн во всей высотной области. Волновые моды высокочастотной ветви спектра могут обладать свойствами гравитационных или акустических волн в разных слоях атмосферы в зависимости от локальной стратификации. При этом генерация волн тепловым источником, как уже было отмечено выше, также происходит в паре. Поэтому на рис. 4 наблюдаются эффекты, характерные и для акустических волн, и для ВГВ. При этом образование термосферных крупномасштабных нагретых областей на рис. 3б можно связать с распространением ВГВ, как и возмущения на высотах турбопаузы. Отсутствие ассиметричного поведения этих возмущений, связанного с эффектами ветровой фильтрации, может быть объяснено резким изменением направления ветра на этой высоте. На небольшом вертикальном участке (около 20 км) в данной области ВГВ распространяются от центра в противоположные стороны, ветер в этом узком слое работает в противоположных направлениях и приводит к тому, что общий эффект, создаваемый ветром, для этих двух направлений волн можно считать примерно одинаковым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные экспериментальные и теоретические исследования позволяют качественно исследовать вертикальное распространение волн из тропосферы в термосферу. Это важно для расширения теоретических представлений о распространении атмосферных волн и уточнения параметризаций влияния этих волн в глобальных численных моделях. Результаты данной работы позволили оценить эффекты взаимодействия волн, генерируемых тепловым тропосферным источником с нейтральным ветром с применением численной модели высокого разрешения, позволяющей рассчитывать мелкомасштабные волны и работающей на высотах от 0 до 500 км.

Результаты показали, что фоновый ветер влияет на распространение волн с периодами ВГВ. Основной эффект такого взаимодействия проявляется в понижении амплитуды ВГВ, распространяющихся по ветру, и повышении в противоположном направлении. Это согласуется с существующими экспериментальными результатами и подтверждает явление волновой фильтрации ветром внутренних гравитационных волн. Полученные результаты позволяют рассматривать тропосферные тепловые возмущения как источник появления среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений.

На распространение и характеристики инфразвуковых волн нейтральный ветер практически не влияет. При этом образуется нагретая область, которая является источником вторичных волн, на которые фоновый ветер может значительно влиять, что проявляется в образовании крупномасштабных волновых возмущений в термосфере. Наблюдаемая волновая картина может являться результатом взаимодействия ветра с ВГВ, которые генерируются в паре с инфразвуковыми волнами при работе теплового тропосферного источника.

Распространение и взаимодействие с ветром волн с частотами приближенными к частоте акустической отсечки и частоте Вейселя–Брента имеет более сложный характер. Это обусловлено тем, что волны в этом частотном диапазоне в неизотермической атмосфере могут менять свои свойства в зависимости от стратификации. Изучение влияния нейтрального ветра на волны в этом частотном диапазоне требуют дополнительного исследования.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № СП-753.2021.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fritts D.C., Vadas S.L., Wan K., Werne J.A.* // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 247.
2. *Fritts D.C., Alexander M.J.* // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. No. 1. P. 1003.
3. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I. et al.* // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. No. 11. P. 2145.
4. *Astafyeva E.* // *Rev. Geophys.* 2019. V. 57. No. 6. P. 1265.
5. *Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В.* // *Физ. Земли.* 2019. № 1. С. 199; *Shalimov S., Rozhnoi A., Solov'eva M., Olshanskaya E.* // *Izv. Phys. Sol. Earth.* 2019. V. 55. P. 168.
6. *Schubert G., Hickey M.P., Walterscheid R.L.* // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. No. D07106.
7. *Hickey M. P., Walterscheid R. L., Schubert G.* // *J. Geophys. Res. Atm.* 2011. V. 116. Art. No. A12326.
8. *Vadas S.L., Liu H.-L.* // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. No. A10. Art. No. A10310.
9. *Karpov I., Kshevetskii S.* // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2017. V. 164. P. 89.
10. *Гаврилов Н.М.* // *Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана.* 1985. Т. 21. № 9. С. 921.
11. *Waldock J.A., Jones T.B.* // *J. Atm. Terr. Phys.* 1986. V. 48. No. 3. P. 245.
12. *Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V. et al.* // *Int. J. Geophys.* 2017. V. 122. No. 7. P. 7567.
13. *Kshevetskii S.P.* // *Comput. Math. Math. Phys.* 2001b. V. 41. No. 2. P. 273.
14. *Kshevetskii S.P.* // *Nonlin. Proc. Geophys.* 2001. V. 8. P. 37.
15. *Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W. et al.* // *Earth Space Sci.* 2015. V. 2. P. 301.
16. *Blanc E., Farges T., A. Le Pichon et al.* // *J. Geophys. Res. Atm.* 2014. V. 119. P. 6409.
17. *Pierce A.D., Coroniti S.C.* // *Nature.* 1966. V. 210. P. 1209.
18. *Киевецкий С.П., Куличков С.Н.* // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана.* 2015. Т. 51. № 1. С. 52.
19. *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1468.
20. *Fritts D., Vadas S., Rigglin D. et al.* // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 3235.
21. *Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др.* // *Совр. пробл. дист. зонд. Земли из косм.* 2011. Т. 8. № 1. С. 319.
22. *Yasyukevich A., Perevalova N.* // *Adv. Space Res.* 2013. V. 52. P. 1416.
23. *Kurdyeva Y., Kulichkov S., Kshevetskii S. et al.* // *Ann. Geophys.* 2019. V. 37. No. 3. P. 447.

Propagation of atmospheric waves generated by tropospheric sources to the upper atmosphere considering background wind

Y. A. Kurdyeva^{a, *}, S. P. Kshevetskii^b

^a *Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236035 Russia*

^b *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236016 Russia*

*e-mail: yakurdyeva@gmail.com

Numerical study of background wind influence on dynamical processes in the atmosphere caused by propagation of waves with different periods from local tropospheric heat sources with using the numerical regional high-resolution model of the atmosphere "AtmoSym" was made. The variations of temperature field caused by the vertical propagation of acoustic and internal gravity waves are calculated, and the effects in the thermosphere are studied.