

УДК 550.385.21

ИЗМЕНЧИВОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ ПРИЛИВОВ В МЕЗОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ И РАДИАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В СТРАТОСФЕРЕ

Е.В. Суворова, А.И. Погорельцев

VARIABILITY OF ATMOSPHERIC TIDES IN THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE DUE TO DYNAMIC AND RADIATIVE PROCESSES IN THE STRATOSPHERE

E.V. Suvorova, A.I. Pogoreltsev

На основе модельных расчетов с использованием модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы исследуется относительная роль распределенных в атмосфере источников немигрирующих приливов. Показано, что зимой, когда планетарные волны в стратосфере хорошо развиты, основной вклад в генерацию немигрирующих приливов вносит нелинейное взаимодействие между мигрирующими приливами и квазистационарной планетарной волной с зональным волновым числом 1 (СПВ1). Учет в модели долготных неоднородностей озона приводит к появлению дополнительных источников немигрирующих приливов, обусловленных неоднородным по долготе нагревом атмосферы, вклад которых может быть сопоставим с вкладом от нелинейного взаимодействия при ослаблении амплитуды СПВ1 в стратосфере.

Relative role of non-migrating tides' sources in the atmosphere is studied on the basis of model calculations using the general circulation model of the middle and upper atmosphere. The main contribution to generation of non-migrating tides is shown to be made by the non-linear interaction between migrating tides and quasi-stationary planetary wave with the zonal wave number 1 (SPW1) in winter when stratospheric planetary waves are strong. Taking account of longitudinal ozone inhomogeneities in the model results in additional sources of non-migrating tides dependent on longitudinally-inhomogeneous atmospheric heating. Their contribution can be compared to contribution made by the nonlinear interaction at weak SPW1 amplitude in the stratosphere.

Приливные колебания ветра и температуры являются одним из основных процессов, формирующих динамический и термический режим мезосферы и нижней термосферы (МНТ). Изучение изменчивости приливов и источников, ответственных за их генерацию, является ключевым моментом, ведущим к пониманию энергетики и динамики данного высотного региона. Разделяют мигрирующие (бегущие за Солнцем) и немигрирующие атмосферные приливы, фазовая скорость которых не совпадает со скоростью движения Солнца [11]. Основным источником мигрирующих приливов является поглощение солнечного излучения водяным паром в тропосфере и озоном на стратосферных высотах [5, 7]. Немигрирующие приливы возбуждаются различными источниками, среди которых отметим нелинейное взаимодействие планетарных волн и мигрирующих приливов [6, 17, 10], выделение скрытой теплоты при фазовых переходах в тропосфере [8], а также долготные неоднородности нагрева атмосферы, обусловленные распределением материков и океанов [16]. В стратосфере источниками немигрирующих приливов являются долготные неоднородности нагрева атмосферы при поглощении солнечной радиации, вызванные неравномерным распределением озона по долготе. В работе на основе модельных расчетов с использованием модели средней и верхней атмосферы (МСВА) исследуется относительная роль распределенных в средней атмосфере источников немигрирующих приливов, обусловленных долготными неоднородностями озона и нелинейным взаимодействием между мигрирующими приливами и СПВ1.

Было проведено два модельных эксперимента (в результате получено два ансамбля решений) по расчету атмосферной циркуляции для условий зимы Северного полушария (январь–февраль) с использованием трехмерной нелинейной модели общей циркуляции атмосферы МСВА [1, 13], разработанной на

основе модели COMMA-LIM [9]. При получении первого ансамбля решений использовалось трехмерное распределение озона с учетом климатических долготных неоднородностей озона [4], во втором случае распределение озона на каждом уровне усреднялись по долготе (Ens1 и Ens2 соответственно). Каждый ансамбль включает 10 вариантов (Runs), рассчитанных с различными начальными условиями. Изменение рассчитанных параметров атмосферной циркуляции от варианта к варианту можно интерпретировать как аналог наблюдаемой в природе межгодовой изменчивости [1].

Предварительные результаты моделирования показали, что при учете долготных неоднородностей озона распределение фазы СПВ1 на геопотенциальной высоте существенно не изменилось, а усредненная по ансамблям амплитуда в стратосфере зимнего полушария возросла примерно на 200 м [3]. В результате нелинейного взаимодействия СПВ1 ($m=1$, период $T=\infty$, т. е. частота $\omega=0$) и мигрирующих суточного ($m=1$, $T=24$ ч) и полусуточного ($m=2$, $T=12$ ч) приливов формируются четыре немигрирующих прилива: ($m=2$, $T=24$ ч) и ($m=0$, $T=24$ ч), ($m=3$, $T=12$ ч) и ($m=1$, $T=12$ ч). Анализ спутниковых измерений [12], а также предварительный анализ наших модельных расчетов показывают, что наиболее существенные амплитуды в МНТ-области имеют немигрирующие суточный ($m=2$) и полусуточный ($m=1$) приливы. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только эти составляющие немигрирующих приливов.

В работе [13] было показано, что во время развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП) замечены долгопериодные изменения мигрирующего суточного прилива, а также происходит существенное увеличение амплитуды немигрирующего полусуточного прилива с $m=1$. Отметим, что при развитии ВСП амплитуда СПВ1, как правило, возрастает из-за нелинейного взаимодействия волны и

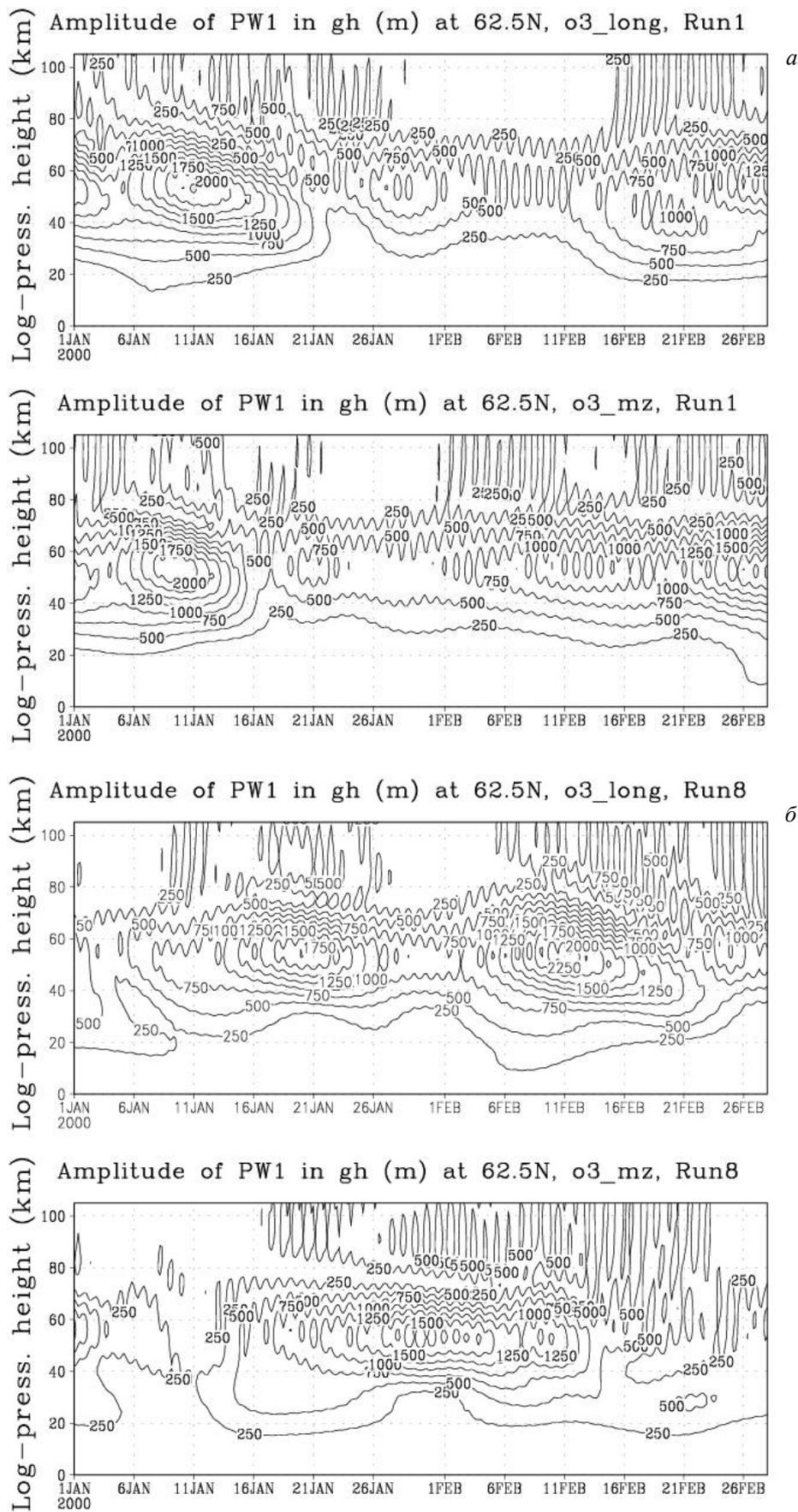


Рис. 1. Высотно-временные сечения амплитуды первой зональной гармоники на геопотенциальной высоте в течение января–февраля на широте 62.5° N для вариантов расчета Run1 (а) и Run8 (б). Верхние и нижние рисунки в каждом варианте соответствуют расчетам при учете и без учета долготных неоднородностей озона соответственно.

зонального потока в стратосфере. Можно ожидать, что доминирующим источником немигрирующих приливов в данном случае будет нелинейное взаимодействие СПВ1 и мигрирующих приливов. При отсутствии ВСП основным источником немигрирующих приливов, по-видимому, является сезонный нагрев, обусловленный долготными неоднородностями озона. Рассматривая временные интервалы с событиями ВСП и при их отсутствии (сильная и слабая СПВ1 соответственно), можно проанализировать вклад каждого из источников генерации немигрирующих приливов. Таким образом, для каждого модельного варианта были рассчитаны изменения в январе–феврале амплитуды зональной гармоники с волновым числом $m=1$ в поле геопотенциальной высоты и среднезонального ветра для широты 62.5° N , а также отклонения среднезональной температуры от осредненных за два месяца значений на широте 87.5° N . Результаты этих расчетов, частично представленные на рис. 1, показывают, что высотно-временные сечения амплитуды первой зональной гармоники на геопотенциальной высоте в течение января–февраля при учете долготных неоднородностей озона и использовании среднезональных значений могут как совпадать (вариант Run1 – одновременные события ВСП), так и находиться примерно в противофазе (вариант Run8). Далее в работе будут рассматриваться результаты модельных расчетов только для варианта Run8.

Для анализа характеристик мигрирующих и немигрирующих приливов в меридиональном ветре с зональными волновыми числами $m=1$ и $m=2$ в МНТ-области и источников их генерации были выбраны временные интервалы с сильной (17–23 января для варианта с учетом долготных неоднородностей озона и 26 января – 1 февраля для варианта с учетом среднезонального распределения озона) и слабой (3–9 января для обоих вариантов) амплитудой первой зональной гармоники (квазистационарной СПВ1). Анализ широтно-высотных распределений амплитуд мигрирующих приливов в меридиональном ветре показал, что их структура остается одинаковой для обоих ансамблей решений как при событиях ВСП, так и при их отсутствии. Рисунок 2 показывает разницу между амплитудами немигрирующих приливов с зональными волновыми числами $m=1$ и $m=2$ как во время сильной, так и во время слабой СПВ1 для обоих модельных ансамблей на высоте максимальных амплитуд приливов 120 км. Очевидно, что амплитуда немигрирующего суточного прилива при событиях ВСП превышает в два раза на низких широтах амплитуду такого же прилива при отсутствии событий ВСП. Амплитуды немигрирующего полусуточного прилива при сильной и слабой СПВ1 имеют также существенные различия (фактор 2–3) для всего Южного полушария, что говорит о его распространении через экватор из области генерации в зимней стратосфере. Данный результат позволяет объяснить наблюдения полусуточного немигрирующего прилива в ветре на высотах МНТ над Южным полюсом [2, 15], хотя рассчитанные амплитуды несколько меньше наблюдаемых.

Анализ климатической изменчивости СПВ1 пока-

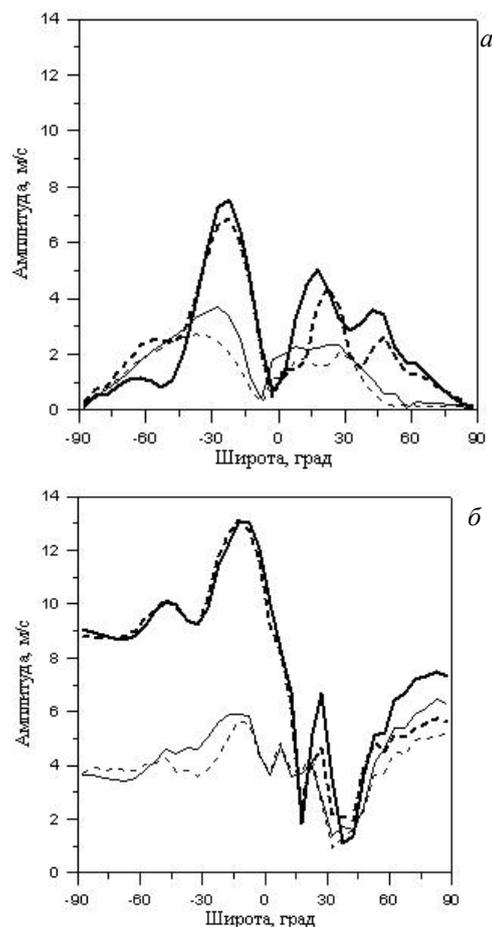


Рис. 2. Амплитуды немигрирующих суточного (а) и полусуточного (б) приливов в меридиональном ветре на высоте 120 км при сильной и слабой СПВ1 (толстые и тонкие линии соответственно). Сплошной линией показан вариант расчета Run8 ансамбля Ens1 (с учетом долготных вариаций озона), штриховой – ансамбля Ens2 (при использовании среднезональных значений озона).

зал значительный рост амплитуды этой волны в зимней стратосфере Северного полушария за последние десятилетия [14], что должно, в свою очередь, приводить к росту амплитуды немигрирующего полусуточного прилива с зональным волновым числом 1 в области МНТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 08-05-00774 и РФФИ-ННИО № 08-05-91950).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.
2. Портнягин Ю.И., Форбс Дж.М., Макаров Н.А., Мерзляков Е.Г. Основные закономерности внутрисуточных колебаний ветра в нижней термосфере над Южным полюсом // Доклады РАН. 1996. Т. 349, № 1. С. 104–105.
3. Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Влияние долготных неоднородностей озона на стационарные планетарные волны и термодинамический режим средней атмосферы // Физика окружающей среды: Материалы VII Международной школы молодых ученых. Томск: Томский государственный университет, 2008. С. 93–96.

4. Суворова Е.В., Федупина И.Н., Ханна Э., Погорельцев А.И. Трехмерная климатическая модель распределения озона в средней атмосфере // Ученые записки: Научно-теоретический журнал. Вып. 10. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. С. 50–59.
5. Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы: Термические и гравитационные. М.: Мир, 1972. 296 с.
6. Angelats i Coll M., Forbes J.M. Nonlinear interaction in the upper atmosphere: The $s=1$ and $s=3$ nonmigrating semidiurnal tides // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A8. P. SIA 3–1. doi:10.1029/2001JA900179.
7. Forbes J.M. Tidal and planetary waves. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory // Geophysical Monogr. Ser. V. 87 / Edited by R.M. Johnson and T.L. Killeen, American Geophysical Union. AGU. 1995. P. 67–87.
8. Forbes J.M., Hagan M.E., Zhang X., Hamilton K., Upper atmosphere tidal oscillations due to latent heat release in the tropical troposphere // Ann. Geophys. 1997. V. 15. P. 1165–1175.
9. Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // Adv. Space Res. 2003. V. 32, N 5. P. 863–868.
10. Grieger N., Schmitz G., Achatz U. The dependence of the nonmigrating diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere on stationary planetary waves // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66. P. 733–754.
11. Lindzen, R.S. Atmospheric tides // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1979. V. 7. P. 199–225.
12. Oberheide J., Gusev O.A. Observations of the migrating and nonmigrating diurnal tides in the equatorial lower thermosphere // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 2167. doi: 10.1029/2002-GL016213.
13. Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 2083–2101. doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014.
14. Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of planetary waves as a signature of possible climatic changes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2009. V. 71, Iss. 14–15. P. 1529–1539. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.
15. Portnyagin Y.I., Forbes J.M., Makarov N.A., Merzlyakov E.G., Palo S. The summertime 12-h wind oscillation with zonal wavenumber $s=1$ in the lower thermosphere over the South Pole // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 828–837.
16. Tsuda T., Kato S. Diurnal non-migrating tides excited by a differential heating due to land-sea distribution // J. Meteorol. Soc. of Japan. 1989. V. 67. P. 43–54.
17. Yamashita K., Miyahara S., Miyoshi Y., Kawano K., Ninomiya J. Seasonal variation of non-migrating semidiurnal tide in the polar MLT region in a general circulation model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1083–1094.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург