

А.И. Погорельцев, Е.В. Суворова, И.Н. Федулina, Э. Ханна

**ТРЕХМЕРНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ОЗОНА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

A.I. Pogoreltsev, E.V. Suvorova, I.N. Fedulina, E. Hanna

**THE THREE-DIMENSIONAL CLIMATIC MODEL
OF THE OZONE DISTRIBUTION IN THE MIDDLE ATMOSPHERE**

Изучение климатической изменчивости и пространственной неоднородности концентрации озона, а также его влияния на формирование термодинамического режима атмосферы, является актуальной и важной задачей для понимания изменчивости климата атмосферы Земли. В работе проведен анализ содержания озона за последнее десятилетие на основе данных, ассимилированных в моделях ECMWF и GOME. Создана трехмерная полужемпирическая модель озона с учетом его долготных неоднородностей. Для условий зимы Северного полушария выполнены расчеты суточных вариаций нагрева атмосферы за счет поглощения молекулами озона солнечной радиации на различных долготах. Показано, что учет долготных неоднородностей концентрации озона приводит к существенной зависимости солнечного нагрева от долготы, что должно сказываться на амплитудах стационарных планетарных волн в стратосфере и приводить к дополнительной генерации немигрирующих атмосферных приливов.

Ключевые слова: озон, долготные неоднородности, модели общей циркуляции атмосферы, нагрев, динамический и тепловой режимы средней атмосферы.

Study of the climatic variability and spatial inhomogeneities of the ozone concentration, and its influence on formation of the atmosphere thermodynamic regime is actual and important problem for understanding of the Earth atmosphere climate change. In the paper the analysis of the ozone concentration during last decade is considered on the basis of the data assimilated in ECMWF and GOME models. The three-dimensional semi-empirical ozone model with taking into account its longitudinal inhomogeneities is created. For the Northern Hemisphere winter-time atmospheric conditions the diurnal variations of the atmosphere heating due to absorption of the solar radiation by the ozone molecules on different longitudes are calculated. It is shown that accounting of the longitudinal ozone inhomogeneities leads to substantial longitudinal dependence of the solar heating that has to change the amplitudes of the stationary planetary waves in the stratosphere and produce an additional forcing of the non-migrating atmospheric tides.

Key words: ozone, longitudinal inhomogeneities, general circulation model, heating, dynamic and thermal regimes of the middle atmosphere.

Поглощение солнечной ультрафиолетовой радиации озоном в стратосфере ведёт к нагреву атмосферы, а также к возбуждению колебаний метеорологических элементов (температуры, давления, плотности, скорости ветра) с частотами кратными суткам, т.е. к генерации, так называемых, мигрирующих атмосферных приливов [Lindzen, 1979]. Наблюдаемое уменьшение содержания стратосферного озона ведет к нарушению радиационного баланса стратосферы и в результате может приводить к сопутствующим изменениям скорости зональ-

ного стратосферного ветра и динамики планетарных волн. Влияние озонного нагревания на планетарные волны (ПВ) в зависимости от широтного градиента общего содержания озона (ОСО) было рассмотрено в работе [Груздев, 1985]. Было показано, что это воздействие особенно сильно сказывается на коротковолновом участке спектра волн Россби. В последние годы, в связи с накоплением наблюдательного материала, объектом исследования становятся долготные неоднородности озона. Например, в январе 1980-ых годов над Центральной Европой ОСО было вдвое больше, чем среднезональное значение, это означает, что долготная составляющая концентрации озона такого же порядка, как и среднезональная. В работах [Hood, 1996; Peters, 1996] было показано, что десятилетние изменения в структуре крупномасштабных волн в поле геопотенциальной высоты будут вызывать аналогичные изменения долготных неоднородностей озона, что обусловлено изменчивостью волнового переноса. Недавние исследования показали, что учет зональных неоднородностей в концентрации озона может сказываться на условиях распространения стационарных планетарных волн (СПВ) за счет дополнительно возбуждения этих волн при поглощении солнечного излучения, а также через изменение индекса рефракции этих волн, обусловленное изменением температуры атмосферы в результате нагрева/охлаждения в озонном слое [Nathan, 2007; Gabriel, 2007; Peters, 2008]. В работе [Nathan, 2007] авторы вводят модифицированный индекс рефракции с учетом влияния озона, учитывающий нагрев, обусловленный взаимодействием стратосферного озона и ПВ. Анализ данного индекса показал, что изменения концентрации озона сказываются на свойствах ПВ двумя способами: через изменения в зональном ветре и температуре и через озонное нагревание, индуцированное волной. Модифицированный индекс рефракции проясняет, как фотохимия озона, адвекция волны и озона и радиационное (ньютоновское) выхолаживание влияют на динамику ПВ. В фотохимически управляемой верхней стратосфере нагрев озоном, обусловленный волной, значительно усиливает термическое подавление, вызванное ньютоновским выхолаживанием, в то время как в динамически контролируемой нижней стратосфере нагрев за счет озона может усиливать или противодействовать ньютоновскому выхолаживанию в зависимости от вертикальной структуры волны и локальных градиентов озона. Показано также, что нагрев за счет озона, индуцированный волной, может увеличивать волновое торможение зонального потока почти в два раза в верхней стратосфере и уменьшать его приблизительно на 25 % в нижней стратосфере. Авторы указывают на необходимость исследования чувствительности отклика волн на нагрев за счет озона для различных фоновых распределений полей ветра, температуры и концентрации озона, а также на важность понимания того, как распределение стратосферного озона может влиять на отражение вниз вертикально распространяющихся ПВ. В статье [Gabriel, 2007] рассматривались осредненные за 10 лет распределения озона на уровне 10 гПа с учетом долготных неоднородностей и было показано, что за последние десятилетия (анализирова-

лись средние за 10 лет распределения, характерные для 1970, 1980 и 1990 гг.) долготные неоднородности озона на средних и высоких широтах северного полушария в январе существенно усилились. На основании модельных расчетов был сделан вывод о том, что эти изменения сказываются на интенсивности СПВ в стратосфере, т.е. приводят к климатической изменчивости динамического режима, что указывает на необходимость учета крупномасштабных долготных неоднородностей в озоне при моделировании общей циркуляции средней атмосферы.

Основной целью данного исследования является анализ доступных данных по распределениям озона, ассимилированных в моделях ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [Uppala et al., 2005], GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) [Global Ozone..., 1995] и представленных в Berlin Model [Fortuin et al., 1995], и создание глобальной полуэмпирической модели распределения озона, которая объединяет на высотах 1000 – 0,003 гПа три указанные полуэмпирические модели. С помощью модельных расчетов планируется изучить динамические и термические эффекты в средней атмосфере, к которым приведет включение долготных неоднородностей концентрации озона в Модель Средней и Верхней Атмосферы (МСВА) [Fröhlich et al., 2003; Погорельцев, 2007; Pogoreltsev et al., 2007].

В исследовании используются два вида ECMWF данных: проект ERA-40 и оперативные данные (Operational Data). Источником данных измерений озона для ECMWF моделей являются спектрометрические спутниковые наблюдения TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometers) и SBUV (Solar Backscattered Ultra-Violet). Данные ERA-40 представляют собой 45-летний проект ре-анализа метеорологических данных за 1957–2002 гг. [Dethof et al., 2004; <http://data.ecmwf.int/data>]. С 2003 г. нами использовались ECMWF Operational Data данные (проект оперативного анализа данных работает с 2002 г. по настоящее время), представляющие собой текущий анализ и процедуру прогноза по ECMWF Integrated Forecasting System [<http://badc.nerc.ac.uk/data/ecmwf-op>]. Эти данные доступны за каждые шесть часов на высотах от 1000 до 1 гПа с глобальным покрытием.

Данные GOME являются результатом ассимиляции OCO, полученного GOME -спектрометром со спутника ERS-2 [<http://wdc.dlr.de/sensors/gome>], в трехмерной фотохимической модели ROSE / DLR (Research for Ozone in the Stratosphere and its Evolution / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), учитывающей перенос атмосферных составляющих [http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/rose/rose_description.html]. Ассимилированные 6-часовые GOME данные озона с глобальным покрытием доступны на вертикальных уровнях от 316 до 0,316 гПа. GOME-1 проект действовал с 1996 по 2005 гг., начиная с 2006 г. данные по озону будут ассимилированы в рамках нового проекта GOME-2.

Berlin Model данные, представляющие собой зонально осредненную среднемесячную концентрацию озона на высотах от 1000 до 0,003 гПа, основаны на тропо-, страто- и мезосферной климатологии озона, объединившей следующие виды данных:

– данные CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere), полученные из спутниковых наблюдений озона между 1978 и 1983 гг. в стратосфере и мезосфере;

– компиляция измерений озоновых станций в тропосфере и нижней стратосфере; концентрация озона для каждой станции была взята со специальным весом, рассчитывающимся исходя из качества и количества измерений озона на станции.

При создании климатической модели озона представлялось интересным сравнить стационарные ПВ в озоне и их изменчивость в стратосфере по ECMWF и GOME данным для использования конкретного типа данных на том или ином вертикальном уровне. Для сопоставления были выбраны месяцы январь и март и вертикальные уровни 10 и 30 гПа, основанием для последнего являлся тот факт, что выше уровня 1 гПа ECMWF данные отсутствуют, а ниже 30 гПа GOME данные имеют значительное количество пропусков в отдельные годы, что снижает их достоверность.

На рис. 1 показаны широтно-долготные распределения отклонений концентрации озона от среднезональных значений в январе на уровне 10 гПа по ECMWF и GOME данным, осредненным за 1996–2005 гг. Видно, что максимальные долготные неоднородности концентрации озона наблюдаются зимой в широтном диапазоне 60–80 N, причем преобладает зональная гармоника (стационарная планетарная волна) с волновым числом $m = 1$, т.е. СПВ1. Несмотря на качественное подобие распределений озона на рис. 1 (а) и (б), отметим, что по GOME данным долготные неоднородности концентрации озона существенно больше (фактор 3, т.е. амплитуда СПВ в озоне в средних и высоких широтах Северного полушария зимой достигает значений порядка 1–1,5 ppmv). На уровне 30 гПа долготные неоднородности озона по данным ECMWF и GOME качественно и количественно подобны (не показано).

Анализ климатической изменчивости концентрации озона по данным ECMWF (1957–2007 гг.) и GOME (1996–2005 гг.) в январе и марте для широты 72,5 N (области с максимальными долготными неоднородностями озона) на уровнях 10 и 30 гПа показал наличие негативного тренда в среднезональной концентрации озона и слабого положительного тренда в амплитуде первой зональной гармоники в поле озона, однако дальнейшее обсуждение данного вопроса выходит за рамки настоящей работы.

Средняя за 10 лет изменчивость долготных неоднородностей концентрации озона в январе на уровнях 10 и 30 гПа по ECMWF и GOME данным для широты 72,5 N показана на рис. 2. Из рисунка видно, что амплитуда долготных неоднородностей на уровне 10 гПа в GOME данных примерно в два раза больше по

сравнению с ECMWF данными, кроме этого, явно преобладает СПВ1. Из рис. 2 (б) следует, что на уровне 30 гПа амплитуда долготных неоднородностей озона в GOME данных качественно и количественно подобна ECMWF данным; также преобладает СПВ1. Отметим, что на амплитуде СПВ в озоне в ECMWF модели возможно сказывается влияние верхней границы модели, подавляющей атмосферные волны и приводящей, таким образом, к существенному их сглаживанию. Для марта месяца получены аналогичные результаты (не показано).

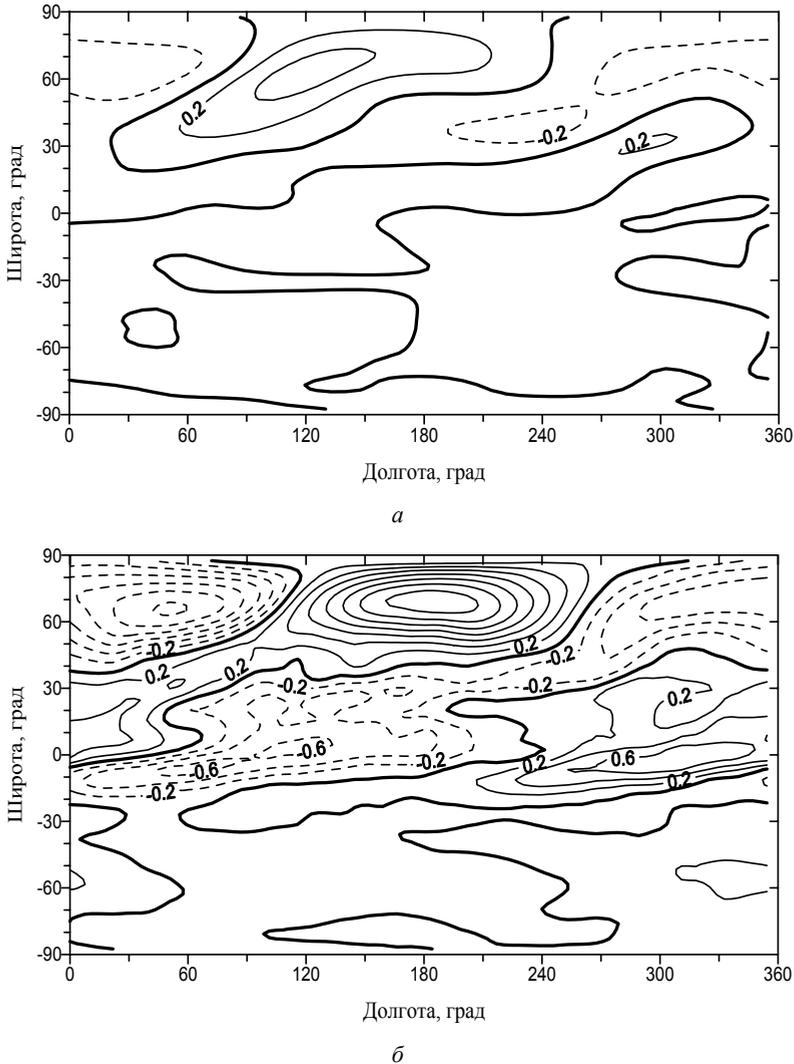


Рис. 1. Осредненное за 1996–2005 гг. широтно-долготное распределение отклонений концентрации озона от среднезональных значений в январе по данным ECMWF (а) и GOME (б) на уровне 10 гПа

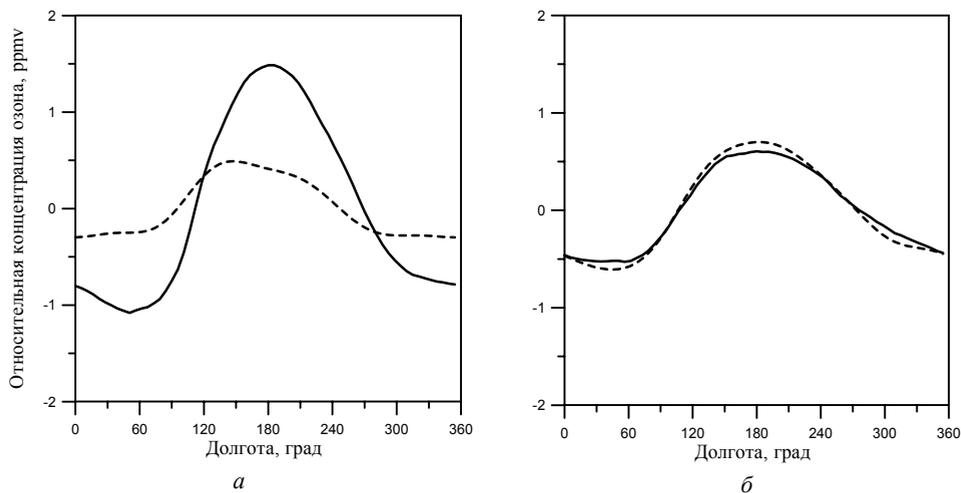


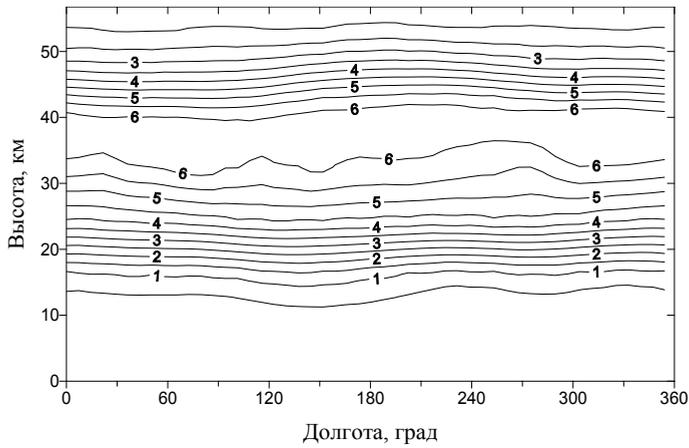
Рис. 2. Осредненные за 1996–2005 гг. долготные вариации относительной концентрации озона по данным ECMWF и GOME (пунктирная и сплошная линии, соответственно) в январе на уровнях 10 гПа (а) и 30 гПа (б) на широте 72,5 N

Выполненный анализ долготных неоднородностей концентрации озона в январе и марте на уровнях 10 и 30 гПа по ECMWF и GOME данным для высоких широт Северного полушария позволяет сделать следующие выводы:

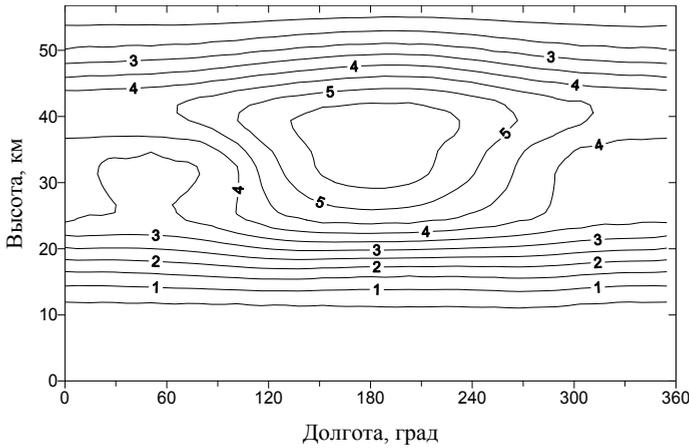
- амплитуда СПВ в озоне на уровне 10 гПа в GOME данных примерно в два раза больше, чем в ECMWF данных, что, вероятно, может быть объяснено влиянием верхней границы ECMWF модели и/или различными схемами ассимиляции данных;

- на уровне 30 гПа имеется достаточно хорошее как качественно, так и количественное согласие в долготных вариациях озона по ECMWF и GOME данным, осредненных за рассматриваемый временной интервал 1996–2005 гг., хотя межгодовая изменчивость долготных неоднородностей концентрации озона по GOME данным существенно сильнее (не показано).

Основываясь на результатах сопоставления моделей ECMWF и GOME, в созданной трехмерной полумпирической модели распределения концентрации озона от уровня 1000 гПа до 30 гПа используются ECMWF данные, от 10 до 0,3 гПа – GOME данные, выше 0,3 и до 0,003 гПа – данные Berlin Model. Между 30 и 10 гПа данные по озону интерполируются, используя распределения ECMWF и GOME. На уровне 0,3 гПа концентрация озона рассчитывается как среднее между значениями моделей GOME и Berlin Model. Таким образом, выходное трехмерное среднемесячное поле озона имеет следующие параметры: сетка 5 / 5,625 градусов (широта/долгота), 39 вертикальных уровней от 1000 до 0,003 гПа. На рис. 3 представлены полученные высотно-долготные распределения концентрации озона для широт 42,5 N и 72,5 N. Учитывая, что выше уровня 0,3 гПа используются среднезональные данные Berlin Model, то показано только 27 нижних уровней.



a



б

Рис. 3. Высотно-долготное распределение концентрации озона согласно полуэмпирической модели за январь 1996–2005 гг. для широт 42,5 N (*a*) и 72,5 N (*б*). Расстояние между изолиниями 0,5 ppmv

Для оценки влияния долготных неоднородностей озона на термический режим средней атмосферы был рассчитан нагрев атмосферы за счет поглощения молекулами озона ультрафиолетовой радиации в стратосфере [полоса Хартли (242–310 нм) и полоса Хаггинса (310–400 нм)] и в тропосфере [полоса Шапюю (400–850 нм)]. Нагрев был рассчитан с весом $\exp\left(-\frac{z-50}{2H}\right)$ с целью оценки эффективного вклада каждой полосы поглощения в генерацию СПВ и немигрирующих приливов на высоте 50 км [Pogoreltsev, 2001], где $H=7$ км – высота однородной атмосферы. На рис. 4 показаны суточные вариации нагрева атмо-

сферы в полосах поглощения Хартли и Хаггинса для различных долгот на высоте 44 км и широте 42,5 N. Максимумы вариаций соответствуют 12 часам локального времени. Долготные вариации нагрева атмосферы в полдень на широте 42,5 N для следующих полос поглощения: полоса Шапюи (высота 44км), полоса Шапюи (30 км), полоса Хартли (44 км), полоса Хаггинса (44км), а также суммарный нагрев на высоте 44 км показаны на рис. 5. Можно видеть, что наибольший вклад в долготную изменчивость суммарного нагрева вносит поглощение молекулами озона солнечной радиации в полосах Хартли и Хаггинса, что объясняется расположением максимума нагрева в полосе Шапюи на высоте 20–25 км.

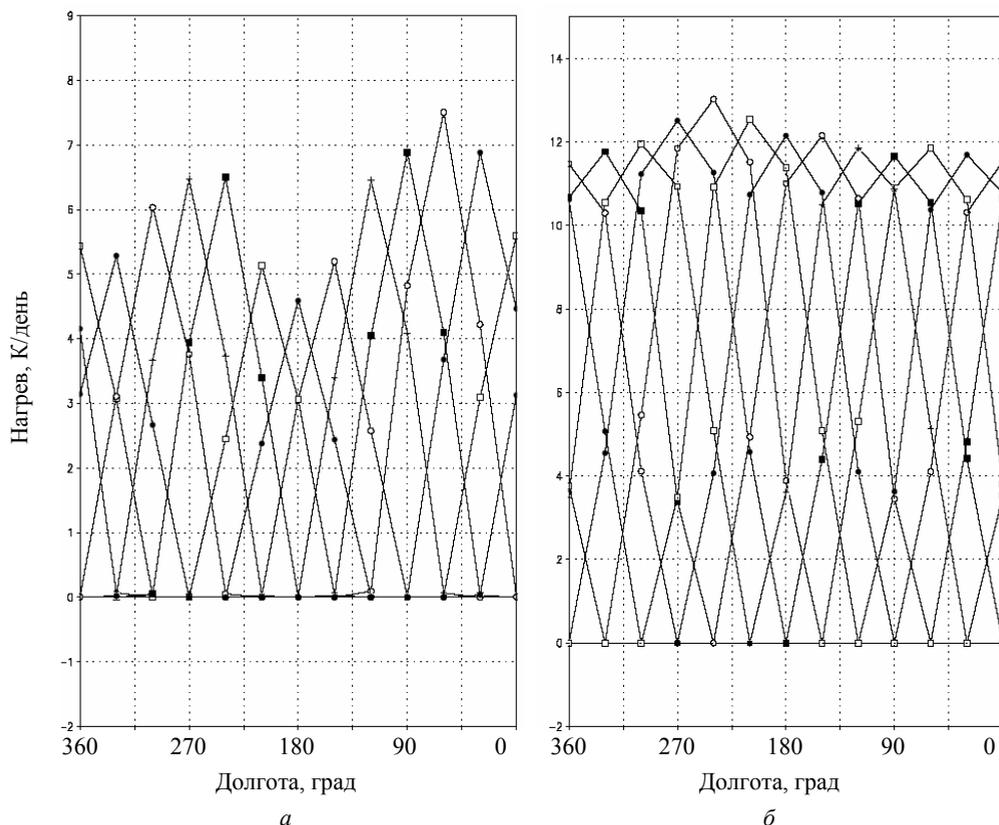


Рис. 4. Суточные вариации нагрева атмосферы в полосах поглощения Хартли (а) и Хаггинса (б) для различных долгот на высоте 44 км и широте 42,5 N. Максимумы соответствуют 12 часам локального времени

Данная работа является первым этапом изучения влияния долготных неоднородностей распределения озона на изменения динамического и термического режимов средней атмосферы. Предварительные результаты моделирования атмосферной циркуляции для условий зимы Северного полушария с помощью МСВА показывают, что учет трехмерного поля озона в модели приводит к уси-

лению амплитуды СПВ1 и СПВ2 в геопотенциальной высоте, и, вследствие нелинейного взаимодействия СПВ1 с мигрирующими приливами, к усилению немигрирующих суточного и полусуточного приливов в меридиональном ветре [Суворова и Погорельцев, 2008]. Необходимы дополнительные расчеты распределения дивергенции потока Элиассена-Пальма для выделения локальных источников генерации немигрирующих приливов в атмосфере и более ясного разделения их источников, т.е. нелинейного взаимодействия СПВ и мигрирующих приливов и незонального нагрева атмосферы, вызванного долготными неоднородностями концентрации озона.

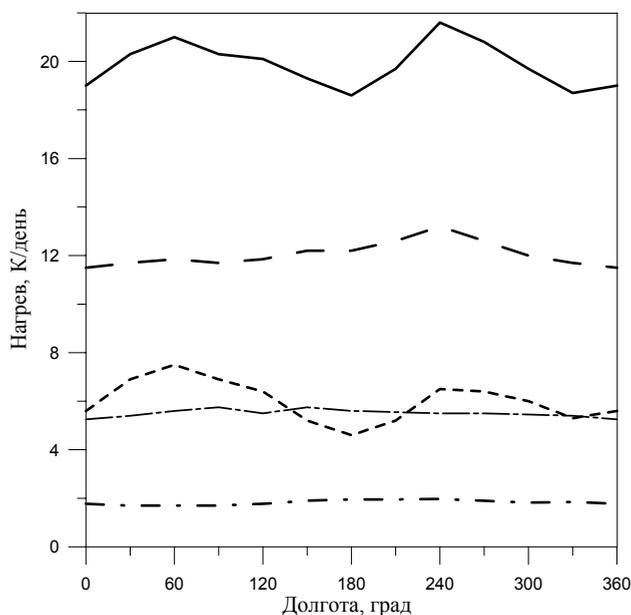


Рис. 5. Долготные вариации нагрева атмосферы в полдень на широте 42,5 N для следующих полос поглощения (снизу вверх): полоса Шапюи (высота 44 км), полоса Шапюи (30 км), полоса Хартли (44 км), полоса Хаггинса (44 км), суммарный нагрев на высоте 44 км

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 08-05-00774) и Национальной программы Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы».

Авторы выражают благодарность доктору Франку Байеру за предоставление данных по распределениям озона, полученным в проекте GOME-1, и BADC (British Atmospheric Data Centre) за предоставление оперативных данных ECMWF.

Литература

1. Груздев А.Н. Влияние озонного нагревания на динамику планетарных волн // Изв. АН СССР, ФАО. 1985. Т. 21, № 11, с. 1148–1159.

2. *Погорельцев А.И.* Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН, ФАО. 2007. Т. 43, № 4, с. 463–475.
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. *Dethof, A. and E.V. Holm.* Ozone assimilation in the ERA-40 reanalysis project. Q.J.R. Meteorol.Soc., Vol. 130, P. 2851–2872, 2004. doi: 10.1256/qj.03.196/
5. *Fortuin J.P.F., Langematz U.* An update on the global ozone climatology and on concurrent ozone and temperature trends. Atmospheric Sensing and Modelling, Proc. SPIE 2311. P. 207–216, 1995.
6. *Fröhlich K., A. Pogoreltsev, and Ch. Jacobi.* Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model, Adv. Space Res., Vol. 32, No. 5, P. 863-868, 2003.
7. *Gabriel, A., D. Peters, I. Kichner, and H.-F. Graf.* Effect of zonally asymmetric ozone on stratospheric temperature and planetary wave propagation. Geophys. Res. Lett., V. 34, L06807, doi: 10.1029/2006GL028998, 2007.
8. Global Ozone Monitoring Experiment GOME. Users Manual. ESA Publications Division. European Space Research and Technology Centre. Netherlands. 1995.
9. *Hood, L.L. and Zaff, D.A.* Lower stratospheric stationary waves and the longitude dependence of ozone trends in winter, J. Geophys. Res., Vol. 100, P. 25 791–25 800, 1995.
10. *Lindzen, R.S.* Atmospheric tides. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., Vol. 7, P. 199-225, 1979.
11. *Nathan, T.R. and E.C. Codero.* An ozone-modified refractive index for vertically propagating planetary waves. J. Geophys. Res., Vol. 112, D02105, 2007. doi:10.1029/2006JD007357,.
12. *Peters, D. and Entzian, G.* January ozone anomaly over the North Atlantic-European region: Longitude-dependent decadal change in the total ozone during 1979–92, Meteor. Z. NF, 5, P. 42–44, 1996.
13. *Peters, D.H.W. et al.* Longitude-dependent decadal ozone changes and ozone trends. Ann. Geophys., Vol. 26, P. 1275–1286, 2008.
14. *Pogoreltsev, A.I.* Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes. Phys. Chem. Earth (Part C). Vol. 26, P. 395-403, 2001.
15. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., and Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. Vol. 69. P. 2083-2101, 2007. doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014.
16. *Uppala, S.M. et al.* The ERA-40 re-analysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 131, P. 2961-3012, 2005. doi: 10.1256/qj.04.176.
17. <http://badc.nerc.ac.uk/data/ecmwf-op/>
18. <http://data.ecmwf.int/data/>
19. http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/rose/rose_description.html
20. <http://wdc.dlr.de/sensors/gome/>