

УДК [551.581: 546.214]:551.513.11

КЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОЗОНА ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА MERRA

Е.В. Суворова, Е.А. Дробашевская, А.И. Погорельцев

Российский государственный гидрометеорологический университет,
ev-suvorova@yandex.ru

На основе данных реанализа MERRA создана климатическая модель трехмерных распределений озона. Выполнен сравнительный анализ различных данных о концентрации озона. Показано, что данные реанализа MERRA согласуются с данными спутниковых экспериментов. Рассчитаны стационарные планетарные волны в полях озона. Сделан вывод о необходимости учета трехмерных распределений озона в моделях общей циркуляции атмосферы.

Ключевые слова: озон, общая циркуляция атмосферы, планетарные волны.

CLIMATIC THREEDIMANSIONAL OZONE DISTRIBUTION MODEL BASED ON MERRA REANALYSIS DATA

E.V. Suvorova, E.A. Drobashetskaya, A.I. Pogoreltsev

Russian State Hydrometeorological University

Using the MERRA reanalysis data the climatic model of three-dimensional ozone distributions has been developed. The comparative analysis of the various data sets on ozone concentration has been performed and it has been shown that MERRA reanalysis data are in good agreement with the satellite measurements. The characteristics of stationary planetary waves in the ozone fields have been calculated. It has been concluded that taking into account the three-dimensional ozone distributions in the atmosphere general circulation models is necessary.

Keywords: ozone, general circulation of atmosphere, planetary waves.

Введение

Начиная с середины восьмидесятых годов XX века в весенние месяцы над Антарктидой регулярно отмечается уменьшение содержания стратосферного озона более чем в два раза — так называемые озоновые дыры. Кроме того, результаты измерений глобальной озонметрической сети и данные спутниковых наблюдений отмечают отрицательную долгопериодную тенденцию изменения среднегодового содержания стратосферного озона в средних широтах обоих полушарий — около 5 % за 10 лет. В то же время, результаты измерений тропосферного озона зафиксировали в последние годы увеличение его содержания со скоростью около 1 % в год [2].

Одним из наиболее важных тепловых источников в стратосфере является нагрев за счет поглощения ультрафиолетовой радиации озоном. Следовательно, уменьшение его концентрации будет оказывать влияние на температуру воздуха, что, в свою очередь, приведет к изменениям ветрового режима и планетарных волн в стратосфере. В то же время, результаты наблюдений показывают, что в Северном полушарии в отличие от Южного области низкой концентрации озона могут образовываться в результате влияния динамических факторов, таких как волновая активность и устойчивость циркумполярного вихря [3].

Для того чтобы объяснить наблюдаемые тенденции изменчивости концентрации озона в земной атмосфере, а также иметь возможность прогнозировать ее в ближайшем и отдаленном будущем, необходимо понимание природы наблюдаемых процессов. Для решения этих задач в последние десятилетия были созданы модели по ассимиляции доступных данных о концентрации озона, запущены спутники для измерения концентрации озона и других атмосферных газов. Таким образом, в настоящее время существует большая база данных для исследования распределения озона в пространстве и во времени.

Глобальные наблюдения за концентрацией озона начались в 1978 г. с запуском спутника Nimbus-7 со спектрометрами Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) и Solar Backscatter Ultra Violet (SBUV). Данные о концентрации озона с этих приборов включены в 40-летний реанализ ERA-40 [17]. Существуют и другие данные спутниковых наблюдений за концентрацией озона: Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE I/II, 1979 г.), Upper Atmospheric Research Satellite (UARS, 1991 г.), Global Ozone Monitoring Experiment (GOME, 1995 г.). Указанные выше и другие виды спутниковых данных о концентрации озона имеют свои недостатки, например пропуски в рядах данных (отсутствуют данные ERA-40 за 1995—1996 гг. в связи с окончанием работы спутника Meteor-3 в декабре 1994 г. и запуском спутника Earthprobe в сентябре 1996 г.; на борту обоих спутников был установлен спектрометр TOMS [5]), ограниченный срок наблюдений или отсутствие открытого доступа.

Отметим также, что длительное время ученые исследовали и включали в радиационный блок моделей общей циркуляции атмосферы среднюю зональную концентрацию озона. Так, данные Berlin Model [6] представляют собой климатическую зонально осредненную среднемесячную концентрацию озона, полученные на основе компиляции спутниковых данных COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA, 1978—1983 гг.) и данных измерений озоновых станций.

В последние десятилетия в ряде работ говорится о необходимости исследования долготной изменчивости структуры озона и учета трехмерного поля озона для адекватного моделирования динамического и термического режимов средней атмосферы [7, 9—13]. Авторами настоящей работы было показано, что учет долготных неоднородностей озона при моделировании общей циркуляции атмосферы с помощью модели средней и верхней атмосферы (МСВА) для января приводит к увеличению амплитуды стационарной планетарной волны с зональным волновым числом $m = 1$ (СПВ1) в геопотенциальной высоте на 200 м, а также к появлению дополнительных источников немигрирующих приливов, обусловленных неоднородными по долготе суточными вариациями нагрева, вклад которых может быть сопоставим со вкладом нелинейного взаимодействия мигрирующих приливов с СПВ1 в стратосфере [1, 4].

Таким образом, становится очевидной необходимость создания климатической модели трехмерных распределений озона на основе доступных однородных данных и учета этих распределений в моделях общей циркуляции атмосферы.

Используемые данные

Для создания трехмерной модели озона были использованы данные ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications

(MERRA) [15]. Проект MERRA представляет собой реанализ доступных данных наблюдений с начала спутниковой эры (1979 г.) по настоящее время. Комбинация данных наземных и спутниковых измерений, а также данных, полученных с помощью радиозондов, существенно повышает качество данных реанализа.

Основным источником данных измерений концентрации озона в реанализе MERRA являются спектрометрические наблюдения со спутников Nimbus 7, NOAA 9, -11, -14, -16 и -17 за период с октября 1978 г. по настоящее время. Радиометр Solar Backscattered UltraViolet 2 (SBUV2) использует 12 каналов в спектральном диапазоне 252—340 нм для измерения концентрации озона. Измерения на восьми длинах волн в коротковолновом ультрафиолетовом диапазоне используются для оценки вертикального профиля содержания озона, в то время как измерения на четырех длинах волн в длинноволновом диапазоне — для получения оценок общего содержания озона.

Параметры выводимого в реанализе MERRA каждые три часа массового отношения смеси для озона (кг/кг): $1,25^\circ$ широты на $1,25^\circ$ долготы, 42 вертикальных уровня в изобарической системе координат от 1000 до 1 гПа.

Климатическая эмпирическая модель распределения озона

Для дальнейшего исследования был выбран период с 2004 по 2014 г., что соответствует длительности 11-летнего цикла солнечной активности. Данные о концентрации озона были проинтерполированы на сетку МСВА, осреднены помесячно и за 11 лет, а также переведены к объемному отношению смеси (единицы измерения ppmv). Таким образом, для каждого месяца были получены трехмерные среднемесячные поля концентрации озона на сетке, имеющей следующие параметры: по горизонтали 5° широты на $5,625^\circ$ долготы, 23 вертикальных уровня от 1,421 до 63,945 км.

На рис. 1 представлены широтно-высотные распределения средней зональной объемной концентрации озона для января, апреля, июля и октября. Подобная структура характерна для всех месяцев года. Из рисунка видно, что максимальная концентрация озона порядка 10 ppmv наблюдается в тропических широтах на высоте 30—35 км (примерно на уровне 10 гПа).

Отклонения объемной концентрации озона от средних зональных значений на высоте 32 км для января, апреля, июля и октября показаны на рис. 2. Из рисунка следует, что долготные неоднородности концентрации озона наблюдаются в высоких широтах Северного полушария с октября по апрель, а в Южном полушарии — преимущественно в сентябре — октябре, причем преобладает зональная гармоника (стационарная планетарная волна) с волновым числом $m = 1$, т.е. СПВ1. Максимальные долготные неоднородности концентрации озона наблюдаются в октябре в обоих полушариях (до 1 ppmv). Следует отметить, что изменчивость концентрации озона по долготе проявляется не в отдельных слоях, а охватывает всю толщу стратосферы, что, в свою очередь, должно оказывать влияние на нагрев атмосферы за счет поглощения молекулами озона солнечной радиации.

Был выполнен сравнительный анализ различных данных о концентрации озона. На высотах стратосферы имеется хорошее соответствие полученных климатических средних зональных распределений по данным реанализа MERRA

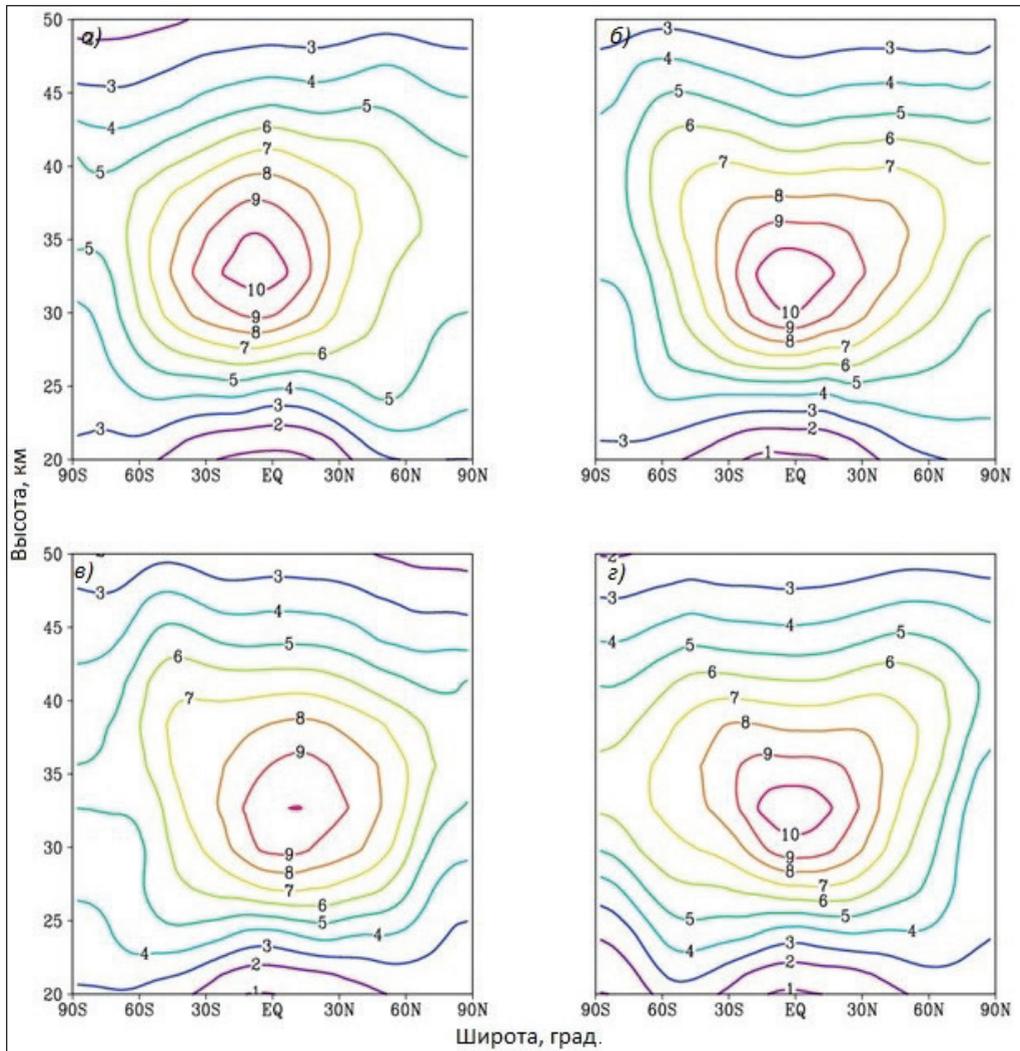


Рис. 1. Широтно-высотные распределения
 средней зональной объемной концентрации озона (ppmv).
a — январь, *б* — апрель, *в* — июль и *г* — октябрь.

с трехмерной полуэмпирической климатической моделью [1] и эмпирической моделью климатологии озона [14].

Для анализа отклонений объемной концентрации озона от среднезональных значений были дополнительно исследованы концентрации озона по данным моделей European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [17] и Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) [8]. Отметим, что концентрации озона по данным модели ECMWF и модели GOME осреднялись за период 1996—2005 гг.

Анализ отклонений относительной концентрации озона от средних зональных значений на уровнях 24,5 и 32 км для января и марта показал, что структура долготных неоднородностей озона схожа для все трех моделей, несмотря на различия в схемах ассимиляции данных. Однако есть различия в значениях, полученных, например, для января на высоте 32 км: амплитуда долготных неоднородностей концентрации озона, по данным модели ECMWF, примерно в два раза меньше по сравнению с данными реанализа MERRA и модели, построенной на основе эксперимента GOME.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данные реанализа MERRA являются надежными данными о концентрации озона за последние 38 лет. Данные за столь длительный период можно использовать для выявления взаимосвязи концентрации озона и солнечной активности, а также для изучения генерации и распространения немигрирующих приливов в атмосфере.

Стационарные планетарные волны в концентрации озона

По климатическим распределениям, полученным на основе данных реанализа MERRA для января, апреля, июля и октября, были рассчитаны амплитуды

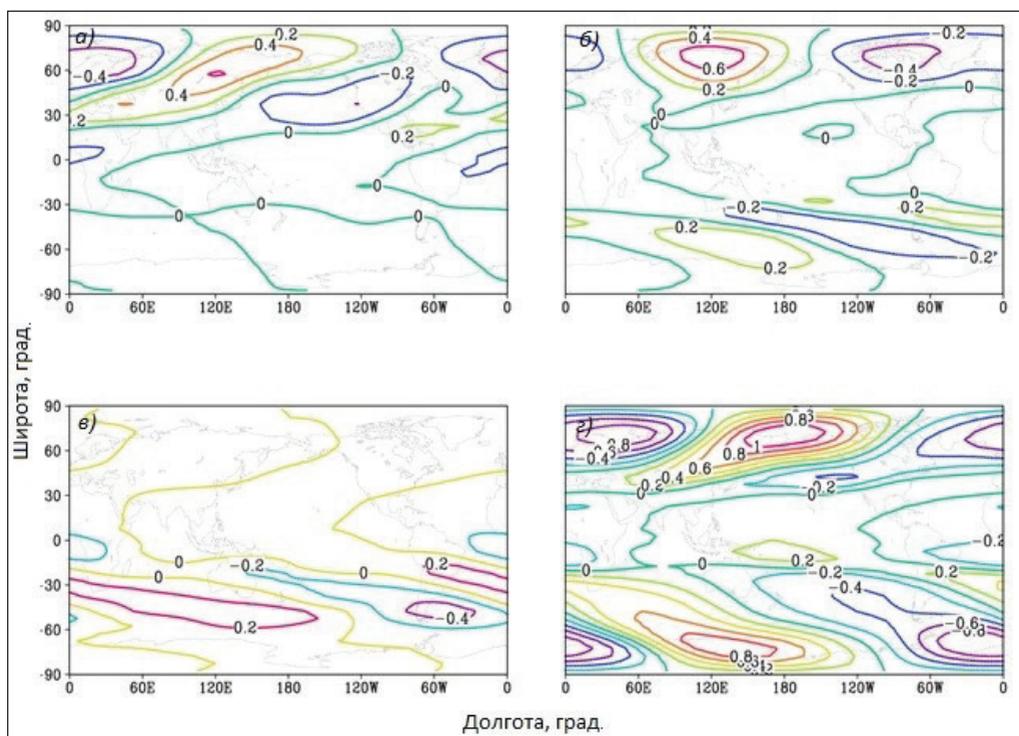


Рис. 2. Отклонения объемной концентрации озона (ppbv) от средних зональных значений на высоте 32 км.
а — январь, *б* — апрель, *в* — июль, *з* — октябрь.

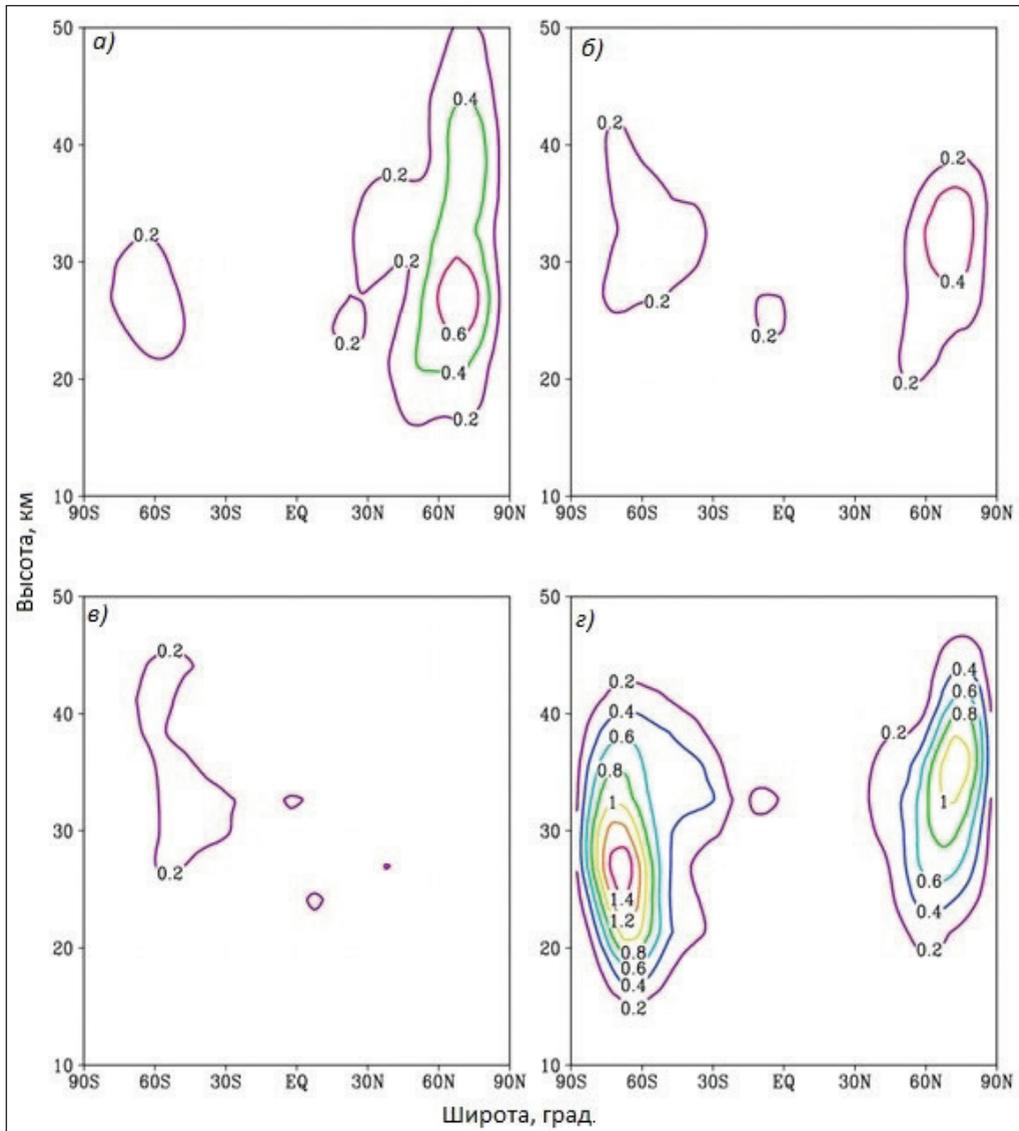


Рис. 3. Амплитуда СПВ1 в объемной концентрации озона (ppmv).
а — январь, *б* — апрель, *в* — июль, *з* — октябрь.

СПВ1 и СПВ2 в объемной концентрации озона. Из рис. 3 следует, что максимальная амплитуда СПВ1 в концентрации озона наблюдается в осенний период в обоих полушариях (1,4 ppmv), в то время как существенная амплитуда СПВ1 отмечается в течение зимы в Северном полушарии (0,6 ppmv.) Весной в Северном полушарии амплитуда СПВ1 мала, а летом практически отсутствует.

Амплитуда СПВ2 в объемной концентрации озона для выбранных месяцев показана на рис. 4. Отметим, что СПВ2, так же как и СПВ1, наблюдается в Северном полушарии преимущественно зимой и в обоих полушариях осенью, максимальные значения амплитуд достигают 0,2 ppmv. В весенний и летний период амплитуда СПВ2 минимальная. Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что в течение всего года амплитуда СПВ1 в концентрации озона больше амплитуды СПВ2.

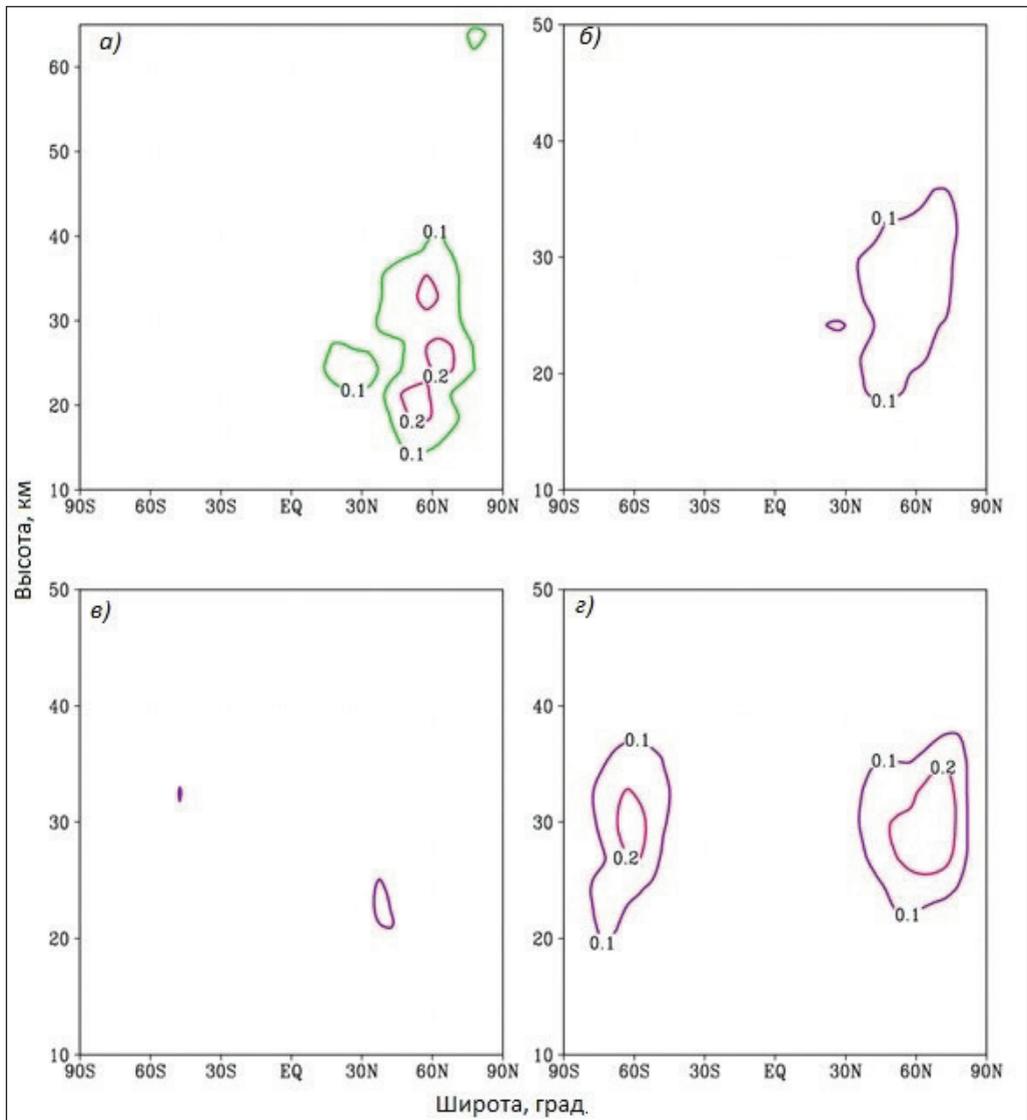


Рис. 4. Амплитуды СПВ2 в объемной концентрации озона (ppmv).
a — январь, *б* — апрель, *в* — июль, *з* — октябрь.

Учитывая, что амплитуды СПВ в озоне имеют максимальные значения в конце зимы и осенью, следует ожидать усиления генерации немигрирующих приливов в эти периоды. Таким образом, учет долготных неоднородностей концентрации озона в моделях общей циркуляции атмосферы может привести к изменению амплитуд СПВ и повлиять на сроки весенней и осенней перестроек циркуляции [16].

Выводы

На основе данных реанализа MERRA создана климатическая модель трехмерного распределения озона. Сравнительный анализ различных данных о концентрации озона показал, что данные реанализа MERRA являются хорошими спутниковыми данными с длительным периодом измерений, которые можно использовать для анализа взаимосвязи концентрации озона и различных физических и химических процессов, происходящих в атмосфере. Были рассчитаны стационарные планетарные волны в концентрации озона, при этом СПВ1 преобладает зимой в Северном полушарии и осенью в обоих полушариях. Для учета полученной по данным реанализа MERRA трехмерной климатической модели распределения озона с учетом сезонных вариаций при моделировании общей циркуляции атмосферы, планетарных волн и приливных колебаний с использованием МСВА была выполнена модификация радиационного блока модели.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект 5.6493.2017/8.9.

Список литературы

1. *Погорельцев А.И., Суворова Е.В., Федулина И.Н., Ханна Э.* Трехмерная климатическая модель распределения озона в средней атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 10. С. 43—52.
2. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 2. С. 210—221.
3. *Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Дробашевская Е.А., Канухина А.Ю.* Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 136—148.
4. *Суворова Е.В., Погорельцев А.И.* Моделирование немигрирующих приливов в средней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 1. С. 107—118.
5. *Dethof A. and E.V. Holm.* Ozone assimilation in the ERA-40 reanalysis project // Q.J.R. Met.Soc. 2004. V. 130. P. 2851—2872. — DOI: 10.1256/qj.03.196.
6. *Fortuin J.P.F., Langematz U.* An update on the global ozone climatology and on concurrent ozone and temperature trends // Atmospheric Sensing and Modelling. 1995. Proc. SPIE 2311. P. 207—216.
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. 2007. V. 34. L06807 — DOI: 10.1029/2006GL028998.
8. Global Ozone Monitoring Experiment GOME. Users Manual. — Netherlands. ESA Publications Division. European Space Research and Technology Centre. 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. 1995. V. 100. P. 25 791—25 800.
10. *Nathan T.R. and Codero E.C.* An ozone-modified refractive index for vertically propagating planetary waves. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D02105. — DOI:10.1029/2006JD007357.

11. *Niu X., J.E. Frederick, M.L. Stein, and G.C. Tiao.* Trends in column ozone based on TOMS data: Dependence on month, latitude, and longitude // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 14661—14669.
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.* 1996. V. 5. P. 42—44.
13. *Peters D.H.W. et al.* Longitude-dependent decadal ozone changes and ozone trends. // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 1275—1286.
14. *Randel W.J. and F. Wu.* A stratospheric ozone profile data set for 1979-2005: Variability, trends, and comparisons with column ozone data. // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 112. D06313 — DOI:10.1029/2006JD007339.
15. *Rienecker M.M., Suarez M.J., R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva, et al.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. // *J. Climate.* 2011. V. 24. P. 3624—3648. — DOI:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
16. *Savenkova, E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G.* Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2012. V. 90—91. P. 1—8. — DOI: 10.1016/j.jastp.2011.11.001.
17. *Uppala S.M. et al.* The ERA-40 re-analysis // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. P. 2961—3012. — DOI: 10.1256/qj.04.176.