

М.А. Моцаков, С.П. Смышляев

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ФОТОХИМИИ ОЗОНА
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МОДЕЛЯХ
ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ**

M.A. Motsakov, S.P. Smyshlyayev

**OZONE PHOTOCHEMISTRY PARAMETERIZATION
DESIGNED FOR MODELING
BY GENERAL CIRCULATION MODELS**

В данной работе рассмотрены принципы построения и приведены результаты тестирования алгоритма параметризации фотохимии озона, предназначенного для использования в моделях общей циркуляции средней атмосферы. На основе разработанной параметризации построена модель для расчета долготных вариаций озона. Сопоставление результатов модельных расчетов долготных вариаций озона с наблюдаемыми климатическими вариациями, полученными на основе спутниковых измерений, показывает хорошее согласие.

Ключевые слова: параметризация, озон, модель.

In this work the foundations of construction ozone photochemistry parameterization algorithm and test results are represented. The algorithm designed for modeling by general circulation models. On the base of the parameterization algorithm the longitudinal ozone variations model was developed by authors. The results of longitudinal ozone variations modeling and satellite measured climatic data comparison are represented. The comparison results show fine conformity.

Key words: parameterization, ozone, model.

Современные совместные «циркуляция атмосферы - газовый состав» модели атмосферы отличаются громоздкостью и высокой требовательностью к вычислительным ресурсам, что значительно ограничивает или делает невозможным их применение при решении задач ансамблевого моделирования климата. Возникает необходимость построения простых параметризационных алгоритмов для описания процессов накопления и разрушения наиболее активных газовых компонент атмосферы.

Обоснование – учет климатических долготных вариаций озона в модели средней и верхней атмосферы (МСВА) приводит к существенному усилению амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) и к генерации немигрирующих приливов [Погорельцев, 2007]. В свою очередь, долготные вариации озона обусловлены вариациями температуры и ветра в поле СПВ. Для самосогласованного учета долготных вариаций озона в моделях общей циркуляции необходимо их рассчитывать на каждом временном шаге. В простейшем виде это можно сделать при помощи параметризационного алгоритма для учета фотохимии озона, аналогичного предложенному в работе [Cariolle, 1986]. Такой подход успешно применялся в глобальных моделях циркуляции [Dethof, 2004], [Suvogova 2008]. В данной работе описаны принципы построения и результаты

реализации параметризации фотохимии озона, которую планируется использовать в МСВА [Погорельцев, 2007]. Алгоритм позволяет корректно описывать процессы образования глобальных возмущений в поле озона и их проявление в интегральном содержании озона, что чрезвычайно важно для моделирования воздействия озона на циркуляцию средней атмосферы. В рассматриваемом алгоритме было использовано положение о линеаризации фотохимических источников и стоков озона. Результаты оценок показали, что продукция и разрушение озона квазилинейны относительно наблюдаемых вариаций озона [Cariolle, 1986]. Параметризация выполнена на основе двумерной модели газового состава «SUNY-SPB» State University of New York at Stony Brook St. Petersburg 2D Chemistry – Transport Model [Smyshlyaev, 1998].

Скорость продукции и разрушения озона и, как следствие, его количество в каждый момент времени в фиксированном объеме атмосферы определяет ряд астрономических и метеорологических факторов. Данная работа описывает процесс создания и применения параметризации фотохимии озона для моделирования долготных его вариаций. Долготная вариация представляет собой отклонение от среднезонального. Так как скорость фотохимических реакций в значительной степени определяется плотностью потока коротковолнового солнечного излучения и температурой среды. Зональная неоднородность поля концентрации озона связана с зональной неоднородностью полей температуры и интегрального содержания озона. В рамках данной работы, моделирование поля долготных вариаций осуществляется из предположения о неизменности во времени поля среднезонального озона. Параметризационный алгоритм строится на основе положения о зависимости скорости продукции и разрушения озона от температуры среды, количества молекул озона в рассматриваемом объеме воздуха и общего числа молекул озона в столбе атмосферы выше рассматриваемого уровня. Следовательно, можно описать динамику изменения количества молекул этого газа, во времени используя следующее уравнение (1), записанное в долготных вариациях (2):

$$\frac{dO'}{dt} = A_T T' + A_O O' + A_I IO', \quad (1)$$

где O' – долготная вариация концентрации озона; IO' – долготная вариация интегрального содержания молекул озона в столбе атмосферы; T' – долготная вариация температуры воздуха; t – время; A – значение коэффициента релаксации (3).

$$X'(\lambda, \varphi, z) = X(\lambda, \varphi, z) - \bar{X}(\varphi, z), \quad (2)$$

где $X(\lambda, \varphi, z)$ – значение переменной T, O, IO в точке с координатами (λ – долгота, φ – широта, z – высота); $X'(\lambda, \varphi, z)$ – долготная вариация величины X ; $\bar{X}(\varphi, z)$ – осредненное по долготе значение.

$$A_T = \frac{\partial B}{\partial T}, \quad A_O = \frac{\partial B}{\partial O}, \quad A_{IO} = \frac{\partial B}{\partial IO}, \quad B = P - D, \quad (3)$$

где A – матрица коэффициентов релаксации; B – баланс между химической продукцией (P) озона в точке и его разрушением (D). Коэффициенты релаксации рассчитываются на основе двумерной модели газового состава атмосферы SUNY-SPB по описанному ниже алгоритму.

При расчете матрицы коэффициентов релаксации, отдельно по каждой из переменных – X (4), для полей остальных переменных необходимо соблюдать условие (5). Рассчитывая коэффициенты, составляющие матрицу A_O , необходимо задавать возмущение ΔX строго в пределах рассматриваемого уровня по высоте, во избежание возмущения значений IO .

$$\frac{\partial B}{\partial X} \approx \frac{B(X + \Delta X) - B(X)}{\Delta X}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где ΔX – возмущение величины X .

Для верификации и подготовки включения алгоритма параметризации в динамическое ядро МСВА была создана глобальная модель, описывающая пространственно-временную динамику распределения долготных вариаций озона на основе трехмерного «Offline» – динамического ядра (6). Модель имеет следующие характеристики: 20 уровней по вертикали (0–60 км), 64 узла по долготе, 36 узлов по широте. Интегрирование уравнений модели производится конечно-разностным методом в сферических координатах с использованием схемы Мацуно [Белов, 1989], шагом по времени – 30 мин.

$$O'^{S+1} = O'^S + \left(\sum_i A_i (X_i - \bar{X}_i) - V' \Delta \bar{O} - \bar{V} \Delta O' \right)^S \tau, \quad (6)$$

где Δ – градиент величины; τ – шаг по времени; S – номер шага по времени; V – вектор скорости ветра; O', V' – долготные вариации концентрации озона и скорости ветра, соответственно; $\bar{X}, \bar{O}, \bar{V}$ – осредненные по долготе значения в момент времени S ; A_i – матрица коэффициентов релаксации для переменной X , $X_i = (T, O, IO)^T$.

Для верификации модели был насчитан ансамбль прогнозов для января месяца, включающий 10 реализаций, различающихся метеорологическими данными, подаваемыми в модель, что позволило отразить межгодовую изменчивость переменных модели в процессе интегрирования.

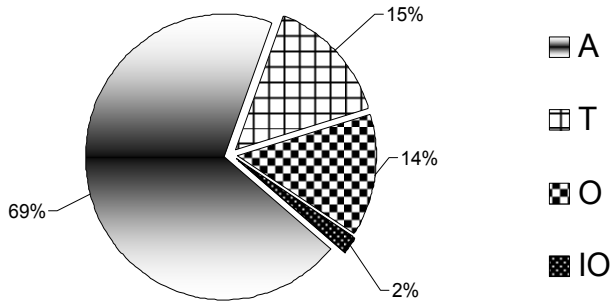


Рис. 1. Средний по ансамблю вклад слагаемых уравнения (1) в формирование долготных вариаций концентрации озона, осредненный по всей области интегрирования, где А – доля слагаемых, описывающих адвекцию

На рис. 1 представлено среднее по области интегрирования распределение вклада различных слагаемых уравнения модели в формирование значений долготных вариаций концентрации озона. Проведенные исследования показали что слагаемые уравнения (1) от величин *O* и *T* работают в противофазе, за некоторым исключением, компенсируя эффект своего воздействия. Таким образом, модель описывает атмосферу как динамически уравновешенную систему, испытывающую колебания от положения равновесия во времени.

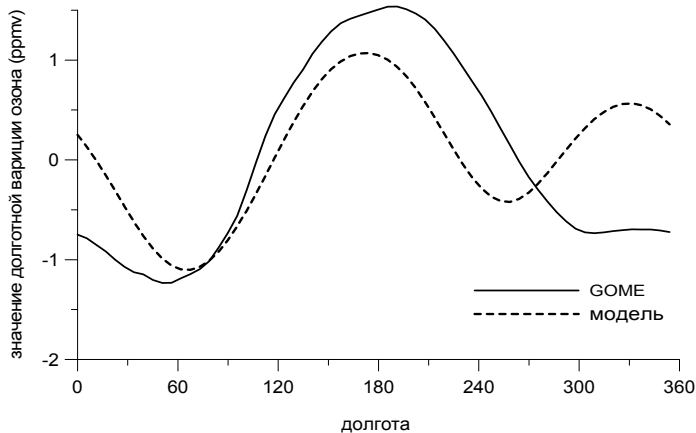


Рис. 2. Профили распределения значения долготной вариации озона на уровне 32 км по кругу широты 67°с.ш.

На рис. 2 пунктирной линией отображен профиль распределения, среднего по ансамблю, значения долготной вариации озона на уровне 32 км по кругу ши-

роты 67 °сш. Сплошной линией обозначен профиль распределения значения долготной вариации озона по данным GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) [GOME, 1995]. Из рисунка очевидна адекватность разработанного алгоритма в отношении климатической изменчивости поля долготных вариаций озона.

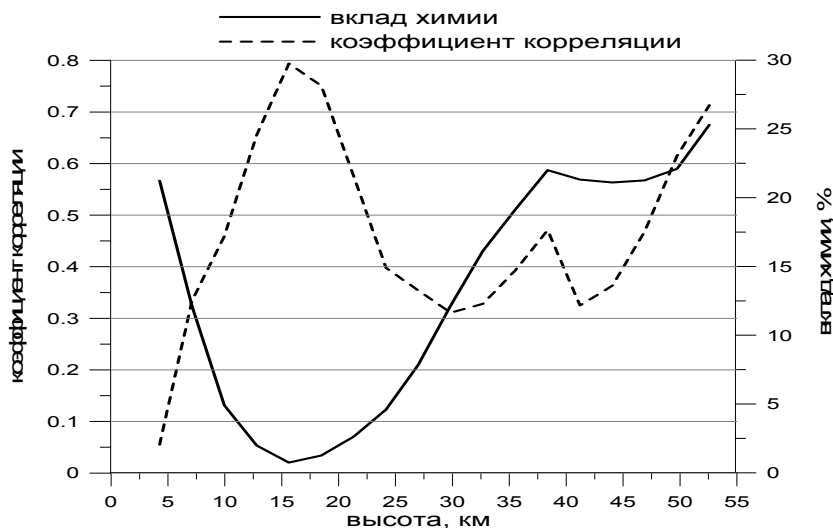


Рис. 3. Распределение по высотам среднего по ансамблю вклада слагаемых, описывающих фотохимию озона, в формирование его долготных вариаций в Северном полушарии. Изменение с высотой корреляции поля долготных вариаций озона в Северном полушарии, по данным GOME и результатам моделирования

На рис. 3 отражено среднее по ансамблю распределение вклада слагаемых правой части уравнения (1) в формирование значений долготных вариаций концентрации озона, выраженное в процентах. Как видно из рисунка, вклад фотохимии озона, в сравнении с вкладом адвекции, растет с высотой, достигая максимума на высоте около 40 км. Это связано прежде всего с ростом влияния вариаций температуры воздуха с высотой. Второй максимум наблюдается в нижней тропосфере и обуславливается спецификой тропосферной химии озона, ее чувствительностью к изменениям локальной и интегральной концентрации озона, согласно проведенному анализу. Распределение коэффициента корреляции показывает корректность работы модели при описании изменчивости реального поля вариаций озона на высотах более 10 км.

Из анализа результатов, представленных на рис. 2 и 3, можно сделать заключение о корректности работы алгоритма параметризации и модели долготных вариаций концентрации озона, что указывает на целесообразность дальнейшего совершенствования алгоритма параметризации и использования предлагаемого подхода для решения прикладных и исследовательских задач моделирования состава и термодинамики стратосферы.

Авторы выражают благодарность А.И. Погорельцеву и Е.В. Суворовой за предоставленные данные результатов моделирования с помощью МСВА и данных GOME, а также внимание к работе и полезное обсуждение результатов.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 08-05-00774).

Литература

1. Белов Н.П., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. – Л.: Гидрометеиздат. 1989, с. 375.
2. Погорельцев А. И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными васциляциями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 4, с. 463–475.
3. Cariolle, D., and M. Deque. Southern hemisphere medium-scale waves and total ozone disturbances in a spectral general circulation model // J. Geophys. Res., 1986, vol. 91, p. 10825–10846.
4. Dethof, A. and E.V. Holm, 2004. Ozone assimilation in the ERA-40 re-analysis project. Q.J.R. Meteorol.Soc., 130, pp. 2851–2872, doi: 10.1256/qj.03.196
5. Suvorova E., Pogoreltsev A. Climatic variability of the longitudinal ozone inhomogeneities in the ECMWF data// 5th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop "Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere", Санкт-Петербург. Доклад: 9–13 сент. 2008 г.
6. Smyshlyaev S.P., V.L. Dvortsov, M.A. Geller and V.A. Yudin. A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation// J. Geophys. Res.- 1998.- V. 103.- P. 28373–28387.
7. Global Ozone Monitoring Experiment GOME. Users Manual// ESA Publications Division. European Space Research and Technology Centre. Netherlands. 1995, см. <http://wdc.dlr.de/sensors/gome>.