

*А.К. Лемищенко, С.П. Смышляев*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ**

*А.К. Lemishchenko, S.P. Smyshlyaev*

## **SOLAR ACTIVITY INFLUENCE ON INTERANNUAL VARIABILITY OF OZONE AND ATMOSPHERIC TEMPERATURE**

*Представлены результаты численных экспериментов с трехмерной интерактивной химико-климатической моделью для учета влияния изменения солнечной активности как на химические, так и на физические процессы с учетом их взаимодействия.*

*Ключевые слова: озон, температура, солнечная активность.*

*Results of numerical experiments with a three-dimensional interactive chemistry climate model are presented to consider the solar activity variation impact both on the chemical and physical processes taking in account their interaction.*

*Key words: ozone, temperature, solar activity.*

### ***Введение***

Термическая структура и состав атмосферы в значительной степени определяются приходящей солнечной радиацией. Под действием радиации в ультрафиолетовом диапазоне длин волн молекулы в атмосфере распадаются, вызывая цепь химических реакций (особенно те, в которых создается озон) и представляя основной источник нагревания средних слоев атмосферы, в то время как излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов в основном достигает и нагревает нижние слои атмосферы и земную поверхность [1]. Таким образом, важным параметром при определении структуры атмосферы является спектральная структура солнечной радиации, так же как температура поверхности Земли. Следовательно, реакция атмосферы на изменчивость солнечного излучения зависит от спектрального распределения приходящей радиации [3].

Вариации приходящей солнечной радиации, т.е. изменение количества энергии, излученной Солнцем в разных спектральных интервалах и на разных временных масштабах, влияют на состояние озонового слоя, который поглощает большую часть ультрафиолетовой радиации от Солнца. С другой стороны содержание озона

определяет, какая часть солнечной радиации доходит до поверхности Земли, а какая ее часть остается в атмосфере и влияет на физические и химические процессы в ней. Таким образом, изменчивость солнечной радиации может повлиять как на изменение состава, так и структуры атмосферы, причем эти изменения могут влиять друг на друга из-за тесной взаимосвязи атмосферных физических и химических процессов [4].

В верхних слоях атмосферы озон препятствует прохождению биологически опасного ультрафиолетового излучения от Солнца, не позволяя ему достичь поверхности Земли [5]. Такое ультрафиолетовое излучение разрушительно действует на генетический материал клеток растений и животных, в том числе человека. Без озонового слоя в верхних слоях атмосферы, как известно, жизнь на поверхности Земли была бы невозможна [11].

Поскольку большая часть озона содержится в стратосфере, мы называем этот регион стратосферным озоновым слоем. В противоположность полезному стратосферному озону тропосферный озон, в больших количествах содержащийся в смоге, является загрязнителем [2, 11]. Хотя он также поглощает ультрафиолетовое излучение, но для дыхания он не полезен, даже ядовит. Высокая химическая активность озона наносит ущерб живым тканям растений и животных. Озон в тропосфере вырабатывается, в основном, в дневное время в загрязненных районах, например городах. Количество озона в стратосфере — это баланс создаваемого солнечной радиацией и разрушаемого в ходе различных каталитических реакций. Но действительное распределение озона — это не только баланс продукции и разрушения. Ветер может переносить озон, изменяя его изначальное распределение и влияние на ультрафиолет у поверхности [1].

Вариации общей солнечной радиации слишком малы, чтобы их можно было обнаружить без спутниковых технологий. Измерение прямого излучения стало доступно только в последние три солнечных цикла и основано на совокупности наблюдений с различных спутников. В настоящее время известно, что суммарная солнечная радиация изменяется (в последние три одиннадцатилетних цикла) в пределах 0,1 % или около 1,3 Вт/м<sup>2</sup> между максимумом и минимумом солнечной радиации в течение одиннадцатилетнего цикла солнечных пятен [3]. Количество солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, примерно равно 1366 Вт/м<sup>2</sup>. Интенсивность солнечной радиации, достигающей Земли, остается примерно постоянной на протяжении последних 2000 лет, с колебаниями примерно в 0,1–0,2 % [7].

Предполагается, что вариации солнечной радиации вместе с вулканической деятельностью могут вносить существенный вклад в изменения климата. Однако интегральные изменения солнечной радиации слишком малы, чтобы быть прямой причиной последних изменений климата [8]. Вместе с тем, изменения солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне спектра могут достигать десятков процентов в рамках 11-летнего цикла солнечной активности [7], влияя на содержание радиационно-активных газов, тем самым оказывая косвенное воздействие на изменения климата [9].

Состав атмосферы сейчас меняется быстрее, чем когда-либо в истории Земли, основная причина этого — человеческая деятельность. Последствия включают в себя изменение климата, уменьшение количества озона и региональное ухудшение качества воздуха. Существуют предположения, что на местный климат также может влиять солнечная активность. Измерения Исследования Солнечной Радиации и Климата под

руководством НАСА показали, что суммарное солнечное ультрафиолетовое излучение более изменчиво, чем изменение общей солнечной радиации.

Как долгосрочные, так и краткосрочные изменения солнечной активности предположительно влияют на климат земного шара, но определить прямую связь изменения солнечной активности с земным климатом очень сложно. Целью настоящей работы являлось исследование долгосрочной изменчивости атмосферного озона и температуры в результате влияния 11-летнего цикла солнечной активности с учетом химических и физических процессов и их взаимосвязи.

### *Методика исследования*

Для проведения исследования была использована трехмерная интерактивная химико-климатическая модель [2]. Газовый состав рассматривался с помощью модели химического переноса [4], а температура и динамические характеристики — с помощью модели общей циркуляции [2]. Химико-климатические модели включают в себя детальное представление фотохимических процессов и радиационного переноса и позволяют учитывать влияние изменения солнечной активности как на химические и физические процессы, так и на их взаимодействие [6, 10].

Для достижения цели настоящей работы были проведены следующие модельные численные эксперименты: динамический анализ концентрации озона и температуры за период 1979–2010 гг. при изменяющейся солнечной активности, при неизменной солнечной активности, при влиянии солнечной активности только на химические процессы и только на нагрев атмосферы.

### *Результаты модельных расчетов*

Результаты численных экспериментов для концентрации озона представлены на рис. 1, 2 для разных широт. В основном результаты моделирования соответствуют реальному распределению озона. Моделирование без учета солнечной активности представляет собой сглаженное реальное распределение озона.

Сравнивая эксперименты без учета солнечного цикла (No solar activity) и влияния на химические процессы (Chem solar activity), можно видеть превышение второго над первым в точках, соответствующих максимуму измеренных значений, это происходит за счет положительной обратной связи фотохимических реакций.

График, представляющий влияние нагрева атмосферы (RAD solar activity) имеет наибольшее отклонение от фактических данных.

Для периода с 1998 по 2004 г. результаты модельных экспериментов ниже, чем фактическое распределение, что может быть обусловлено высокой концентрацией аэрозолей и влиянием температуры поверхности моря. В этой работе не рассматривалось влияние температуры поверхности моря, оно будет изучаться в дальнейшем.

В тропических широтах хорошо выражены те же зависимости. Сравнивая рис. 1 и 2 можно увидеть, что с увеличением рассматриваемой территории увеличивается отклонение от фактических данных в период с 1998 по 2004 г. и отклонение случая

RAD solar activity от фактических данных. Это может быть обусловлено влиянием концентраций хлоринов и бромидов.

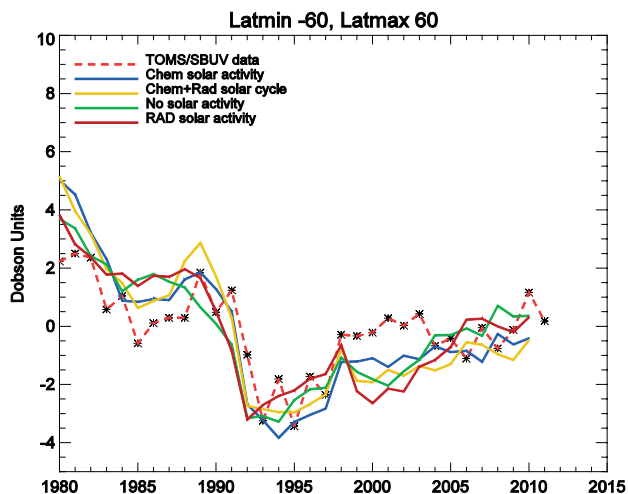


Рис. 1. Результаты моделирования и измерений озона для широт от  $-60$  до  $60$

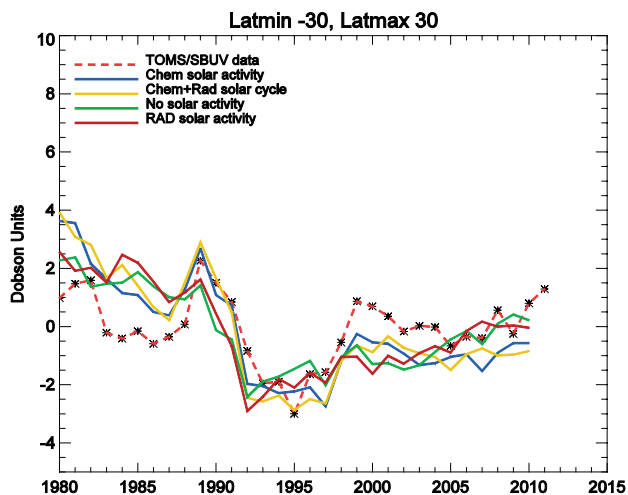


Рис. 2. Результаты моделирования и измерений озона для широт от  $-30$  до  $30$

Результаты моделирования для температуры нижней тропосферы представлены на рис. 3. На рис. 3 представлены результаты тех же модельных экспериментов. Результаты моделирования температуры нижней тропосферы хорошо воспроизводят основные особенности изменчивости температуры. Влияние солнечной активности

на температуру незначительно. Только изменение суммарной солнечной радиации косвенно влияет на температуру через нагрев атмосферы.

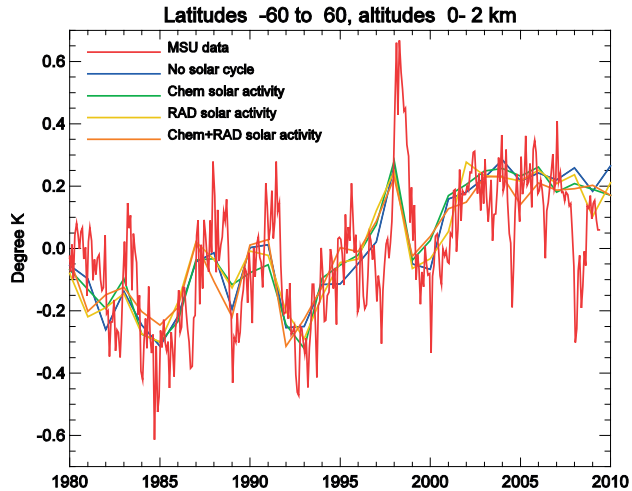


Рис. 3. Модельные и фактические данные температуры нижних слоев тропосферы на широтах от  $-60$  до  $60$

На рис. 4 представлена температура стратосферы. Влияние солнечной активности на стратосферу больше, чем на тропосферу за счет большей концентрации озона, озон поглощает радиацию и способствует нагреванию атмосферы. Также на температуру оказывают воздействие концентрации аэрозолей. В XXI в. прослеживаются некоторые изменения во временном распределении величин.

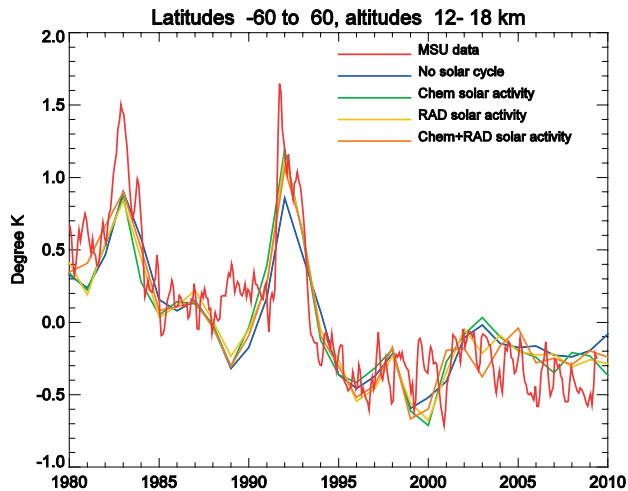


Рис. 4. Модельные и фактические данные температуры нижних слоев стратосферы для широт от  $-60$  до  $60$

### Заключение

На основании сравнения результатов модельных экспериментов с данными наблюдений можно сделать следующие выводы: химико-климатическая модель хорошо подходит как для описания изменений температуры, так и для изменения содержания озона; взаимодействие между химическими и физическими процессами важно при изучении изменения температуры и изменчивости состава атмосферы. Также необходимо дальнейшее исследование изменения взаимосвязей между XX и XXI в. и чувствительности параметров к изменению солнечной активности в разных спектральных диапазонах.

Изучение влияния изменчивости спектральных потоков солнечной радиации на состав атмосферы проводилось при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а). Используемая глобальная модель изменения состава атмосферы под воздействием динамических изменений в тропосфере и стратосфере разработана в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ. Исследование влияния обратных связей между физическими и химическими процессами на содержание малых газов осуществлялось при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 14-17-00096).

### Литература

1. Блакитная П.А., Смышляев С.П., Атласкин Е.М., Шаарийбуу Г. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы. // Учёные записки РГГМУ, 2011, № 12, с. 25–38.
2. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы. // Известия РАН. Сер. ФАО, 2007, т. 43, № 4, с. 437–452.
3. Логинов В.Ф., Ракипова Л.Р., Сухомазова Г.И. Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 80 с.
4. 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. 211–222.
5. Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П. Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью на содержание атмосферного озона. // Метеорология и гидрология, 2005, № 8, с. 25–37.
6. Eyring V., Lamarque J.-F. Global chemistry-climate modeling and evaluation. // EOS, Transaction American Geophysical Union, 2012, vol. 93(51), pp. 539–539.
7. Haigh J. D., Winning A.R., Toumi R. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. // Nature, 2010, vol. 467, pp. 696–699.
8. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell, K., Johnson C.A. — U.K., Cambridge, Cambridge University Press, 2001. — 881 p.
9. Matthes K., Koderka K., Haigh J.D. GRIPS solar experiments intercomparison project: Initial results. // Pap. Meteorol. Geophys., 2003, vol. 54, pp. 380–395.
10. Wang C., Prinn R.G., Sokolov A.P. A Global Interactive Chemistry and Climate Model. // J.Geophys.Res., 2013, vol. 103, № D3, pp.3399–3417.
11. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2.