

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ

С.П. Смышляев

MODELING THE INTERACTION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PARAMETERS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

S.P. Smyshlyayev

В последнее время по результатам наблюдений обнаружены тревожные тенденции долгопериодной изменчивости климата и газового состава атмосферы, такие как глобальное потепление в тропосфере, выхолаживание стратосферы, истощение озонового слоя в стратосфере и увеличение содержания озона в тропосфере [Брасье, Соломон, 1987; Александров и др., 1992]. Эти изменения происходят одновременно и могут быть связаны, поскольку как увеличение, так и уменьшение температуры воздуха может привести к вариациям скоростей химических реакций и в результате к изменению содержания атмосферных газов. В свою очередь, изменение концентраций радиационно-активных газов в атмосфере, таких как озон, метан, фреоны или водяной пар, оказывает заметное влияние на радиационный нагрев и выхолаживание в атмосфере и, следовательно, на соответствующие вариации ее циркуляции и температурного режима [Ракипова, 1977; Scientific Assessment..., 2006].

Предполагается, что наблюдаемые изменения климата и газового состава атмосферы могут быть в значительной степени обусловлены антропогенным воздействием на окружающую среду [Александров и др., 1992; Брасье, Соломон, 1987]. Вместе с тем естественная природная изменчивость разных временных масштабов также может привести к существенным изменениям структуры и состава атмосферы, сравнимым по амплитуде с антропогенным воздействием [Lean et al., 1997; Lean, 2000]. Одним из подобных естественных факторов является 11-летний цикл солнечной активности, в процессе которого потоки солнечной радиации в ультрафиолетовой области солнечного спектра могут значительно изменяться от минимума к максимуму солнечной активности [Логинов и др., 1980; Shindel et al., 1999; Rottman, 2000].

Солнечное излучение дает большую часть энергии, управляющей физическими и химическими процессами в земной атмосфере [Александров и др., 1992]. Нагрев атмосферы в результате поглощения газами и аэрозолем солнечного излучения инициирует динамические процессы разного масштаба, определяющие перенос массы и тепла в атмосфере, в результате чего формируются температурный режим атмосферы и распределение ее газов [Брасье, Соломон, 1987]. Изменения температуры атмосферы могут, в свою очередь, повлиять на скорости химических реакций и, следовательно, опять же на пространственное распределение химически активных газов атмосферы. В то же время фотодиссоциация атмосферных газов в результате поглощения солнечной радиации дает начало химическим процес-

сам образования и разрушения озона и влияющих на него газов [Брасье, Соломон, 1987; Scientific Assessment..., 2006]. Следовательно, изменения потока солнечной энергии, достигающего земной атмосферы, могут как непосредственно повлиять на изменение концентраций атмосферных газов через изменение скоростей фотодиссоциации (прямой эффект), так и косвенным образом оказать влияние на распределение атмосферного газового состава через изменение радиационного нагрева атмосферы с соответствующими изменениями температуры, скоростей химических реакций и переноса газов атмосферными потоками массы (непрямые эффекты).

На основании визуальных наблюдений за количеством солнечных пятен было установлено существование 11-летнего цикла солнечной активности [Ракипова, 1977]. Изменения интегрального потока (по всем длинам волн) солнечной радиации при этом невелики и составляют десятые доли процента [Ракипова, 1977; Lean, 2000]. Однако излучение в ультрафиолетовой области спектра меняется гораздо сильнее, чем полный поток [Lean, 2000]. Инструментальные измерения вариаций интенсивности потоков солнечной радиации появились сравнительно недавно. Спутниковые измерения интенсивности внеатмосферной солнечной радиации в разных участках солнечного спектра, проводившиеся в течение последних лет, показали, что в ультрафиолетовой области спектра изменения солнечной активности от минимума к максимуму в течение 11-летнего цикла могут привести к увеличению потоков солнечной радиации более чем на 20 % при длинах волн менее 200 нм и в пределах 10 % – в диапазоне 200–300 нм [Lean et al., 1997; Rottman, 2000; Shindel et al., 1999]. Учитывая тот факт, что ультрафиолетовая часть спектра является определяющей для фотохимии атмосферного озона и значимой при формировании нагрева атмосферы, подобные изменения солнечной радиации могут привести к существенным возмущениям фотохимических и радиационных процессов в атмосфере, а следовательно, и к изменению циркуляции атмосферы и ее газового состава.

Изучению влияния солнечной активности на изменения структуры и состава атмосферы в последнее время уделялось значительное внимание [Логинов и др., 1980; Jackman et al., 1996; Lean et al., 1997; Shindel et al., 1999; Lean, 2000; Rottman, 2000; Груздев, Брассер, 2007; Смышляев и др., 2005; Geller, Smyshlyayev, 2002], однако в основном исследовались прямые эффекты, хотя и значимость непрямых эффектов также неоднократно оценивалась (как, например, в [Брассер, 2007]). Вместе с тем взаимо-

связь между одновременным воздействием изменений солнечной активности на нагрев атмосферы и содержание ее газов еще изучена недостаточно. Солнечная активность является природным фактором, который может оказать влияние как на физические, так и на химические процессы в атмосфере. В то же время обратные связи между этими процессами могут существенно изменить масштаб и даже направление влияния солнечной активности на физические и химические процессы в атмосфере и, следовательно, на тепловой режим и газовый состав атмосферы.

Для теоретического исследования влияния естественных и антропогенных факторов на содержание газов и температурный режим атмосферы используются численные математические модели газового состава (МГС) [Lean et al., 1997; Lean, 2000; Смышляев и др., 2005; Eyring et al., 2005] и общей циркуляции атмосферы (МОЦА) [Алексеев и др., 1998; Geller, Smyshlyaev, 2002; Смышляев и др., 2004; Eyring et al., 2006]. При использовании МГС для изучения проблемы изменения содержания атмосферных газов для вычисления пространственно-временного распределения всех влияющих на озон газовых составляющих часто используются поля ветра и температуры из МОЦА. Вместе с тем при применении МОЦА для изучения проблемы глобального потепления задаются фиксированные поля концентрации озона и других радиационно-активных газов атмосферы, необходимые для расчета нагрева атмосферы, который управляет атмосферной циркуляцией. При этом обратное влияние рассчитываемых полей содержания озона на динамику не учитывается.

Взаимосвязь МОЦА и МГС до последнего времени не рассматривалась, хотя и является важной. Однако в последнее время возможности для исследования относительной роли прямых и непрямых эффектов влияния солнечной активности на состав атмосферных газов и их взаимодействие возросли после разработки целого ряда химико-климатических моделей (ХКМ) нижней и средней атмосферы [Eyring et al., 2005, 2006; Галин и др., 2007]. ХКМ представляют собой в единый программный блок моделей общей циркуляции атмосферы и моделей газового состава атмосферы. При этом на каждом временном модельном шаге в МГС используются поля ветра и температуры, рассчитанные в МОЦА. В то же время в МОЦА для расчета радиационного нагрева атмосферы, который определяет изменчивость как температуры, так и динамики атмосферы, используются концентрации озона и других радиационно-активных газов атмосферы, рассчитанные в МГС на том же временном шаге. Таким образом, в ХКМ становится возможным учесть обратные связи между изменчивостью рассчитываемых полей содержания озона и других радиационно-активных газов атмосферы, а также расчетными полями температуры и характеристиками динамики атмосферы.

Изменение потоков радиации, вызванное вариациями солнечной активности, может, с одной стороны, вызывать прямые эффекты изменения температуры и газового состава атмосферы, а с другой сто-

роны, косвенным образом влиять на состав и структуру атмосферы. Непрямые эффекты 11-летнего цикла солнечной активности потенциально могут как усилить направление воздействия прямых эффектов, так и частично или полностью скомпенсировать их. В частности, при увеличении потоков солнечной радиации может увеличиться, с одной стороны, продукция озона, с другой стороны, температура атмосферы, которая может повлиять на скорости химического разрушения озона, а с третьей стороны, из-за увеличения нагрева атмосферы может измениться интенсивность циркуляции, в результате чего произойдет перераспределение содержания озона и других газов. При перераспределении радиационно-активных газов меняются как скорости химических реакций с их участием, так и нагрев атмосферы, зависящий от их концентраций. Таким образом, могут возникать как положительные, так и отрицательные обратные связи между физическими и химическими процессами в атмосфере в результате изменения солнечной активности.

Для изучения значимости прямых и косвенных эффектов солнечной активности, а также значимости возникающих положительных и отрицательных обратных связей целесообразно использовать химико-климатическое моделирование, позволяющее учесть взаимосвязи между физическими и химическими процессами в атмосфере. В частности, для исследования глобальных эффектов одновременно влияния солнечной активности на состав и структуру атмосферы можно использовать глобальные ХКМ нижней и средней атмосферы, охватывающие тропосферу, стратосферу и мезосферу. Особенностью ХКМ является интерактивный обмен расчетными данными между МОЦА и МГС на каждом шаге по времени, что позволяет учитывать взаимодействие фотохимических и динамических процессов в атмосфере [Галин и др., 2007].

Влияние солнечной активности на нагрев атмосферы в ХКМ учитывается зависимостью интенсивности коротковолновой солнечной радиации от уровня солнечной активности. Для учета влияния солнечной активности на нагрев атмосферы в ХКМ используются данные о процентном изменении интенсивности потоков солнечной радиации при изменении солнечной активности от минимума к максимуму (рис. 1). Эти данные получаются путем комбинирования результатов спутниковых наблюдений в течение нескольких 11-летних циклов [Lean et al., 1997; Lean, 2000; Rottman, 2000]. Базовые значения интенсивности солнечной радиации [Алексеев и др., 1998] в спектральном интервале 200–450 нм задаются увеличенными или уменьшенными на половину амплитуды в соответствии с рис. 1 для максимума и минимума солнечной активности.

Измерения в ультрафиолетовом диапазоне отличаются от одного 11-летнего цикла к другому, хотя общая тенденция уменьшения амплитуды изменения потоков при увеличении длины волны сохраняется. При этом количественные характеристики, полученные в конце XX в. (NRL data), дают меньшие колебания потоков солнечной радиации по сравнению с измерениями начала XXI в. (SORCE data). Подобные

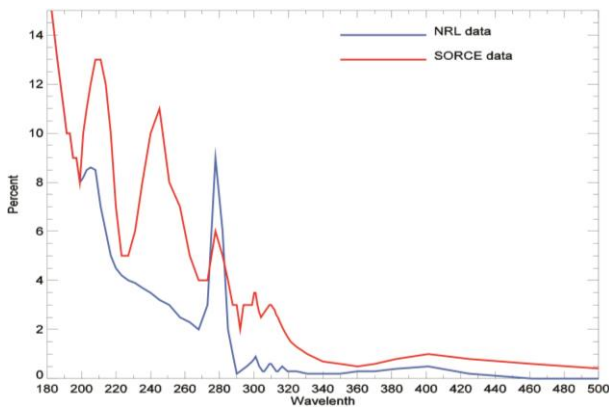


Рис. 1. Процентное изменение потоков солнечной радиации в 11-летнем цикле солнечной активности от минимума к максимуму.

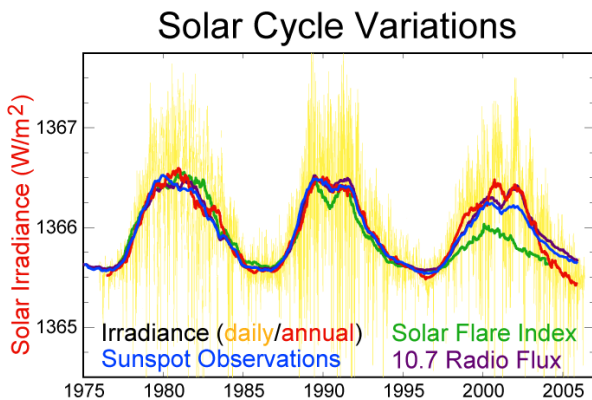


Рис. 2. Временная изменчивость характеристик солнечной радиации в 11-летних циклах.

отличия могут повлиять как на прямые, так и на косвенные эффекты влияния солнечной активности на состав атмосферы и климат.

Для моделирования временной изменчивости состава и структуры атмосферы при изменении солнечной активности необходимо определить, как амплитуда потоков солнечной радиации меняется со временем. Для этого можно использовать или результаты измерений радиоизлучения на длине волны 10.7 см, или количество солнечных пятен (рис. 2). Объединение спектральной изменчивости потоков солнечной радиации от минимума к максимуму 11-летнего цикла (рис. 1) с временными циклами (рис. 2) при расчете потоков солнечной радиации в физическом и химическом блоках химико-климатических моделей нижней и средней атмосферы позволяет проводить количественные оценки влияния солнечной радиации на состав и структуру атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 288 с.

Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я. и др. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН: Препринт ИВМ РАН № 2086-В98. М., 1998. 180 с.

Брасье Г., Соломон С. Аэрномия средней атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 291 с.

Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 347–452.

Груздев А.Н., Брассер Г.П. Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // Там же. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 3. С. 379–391.

Логинов В.Ф., Ракипова Л.Р., Сухомазова Г.И. Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 80 с.

Ракипова Л.Р. Влияние солнечной активности на циркуляцию и температуру стратосферы // Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 3–9.

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.

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.

Eyring V., Harris N.R.P., Rex M., et al. A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models // Bull. American Meteorol. Soc. 2005. V. 86. P. 1117–1133.

Eyring V., Butchart N., Waugh D.W., et al. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D22308. doi:10.1029/2006JD007327.

Geller M.A., Smyshlyayev S.P. A model study of total ozone evolution 1979–2000 – The role of individual natural and anthropogenic effects // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 22. 2048. doi:10.1029/2002GL015689.

Jackman C.H., Fleming E.L., Chandra S., et al. Past, present, and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 28753–28767.

Lean J.L., Rottman G.J., Lee Kyle H., et al. Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet (200–400 nm) // Ibid. 1997. V. 102. P. 29,939–29,956.

Lean J. Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. P. 2,425–2,428.

Rottman G.J. Variations of solar ultraviolet irradiance observed by the UARS SOLSTICE – 1991 to 1999 // Space Sci. Rev. 2000. V. 94. P. 83–91.

Shindel D., Rind D., Balachandran N., et al. Solar cycle variability, ozone and climate // Science. 1999. V. 284. P. 305–308.

Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2007 // World Meteorological Organization: Global ozone research and monitoring project. Report 47. 498 p.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия