

МЕТЕОРОЛОГИЯ

П.А. Блакидная, С.П. Смышляев, Е.М. Атласкин, Г. Шаарийбуу

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ АТМОСФЕРЫ

P.A. Zimenko, S.P. Smyshlyayev, E.M. Atlaskin, G. Shaaribu

A MODEL STUDY OF THE SOLAR ACTIVITY EFFECTS ON THE VARIABILITY OF THE GAS COMPOSITION AND TEMPERATURE IN THE ATMOSPHERE

Трехмерная интерактивная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для исследования взаимосвязи химических и физических процессов на примере влияния вариаций потоков солнечной радиации, вызванных изменениями солнечной активности, на температуру и содержание озона. Результаты численных экспериментов с отдельным и совместным влиянием солнечной активности на химический состав и циркуляцию атмосферы показали, что обратные связи могут оказать как количественное, так и качественное воздействие на содержание озона и температуру.

Ключевые слова: озон, температура, солнечная радиация, солнечная активность, обратные связи.

A three-dimensional interactive chemistry climate model of the lower and middle atmosphere is used to study interactions between chemical and physical processes in the atmosphere due to solar flux variations induced by solar activity changes on the temperature and atmospheric ozone variability. The model results have shown that indicated that feedbacks between ozone and temperature changes can have a both quantitative and qualitative impact on the temperature and atmospheric ozone variability.

Key words: ozone, temperature, solar radiation, solar activity, feedbacks.

Результаты наблюдений последнего времени свидетельствуют о тревожных тенденциях долгопериодной изменчивости температурного режима и газового состава атмосферы, такие как глобальное потепление в тропосфере, выхолаживание стратосферы, истощение толщины озонового слоя в стратосфере и увеличение его содержания в тропосфере [IPCC, 2001; WMO, 2003]. Эти изменения происходят одновременно и могут быть связаны, т.к. как увеличение, так и уменьшение температуры воздуха может привести к вариациям скоростей химических реакций с результирующим изменением содержания атмосферных газов. В свою очередь, изменение концентраций радиационно-активных газов в атмосфере, таких как озон, метан, фреоны или водяной пар, оказывает замет-

ное влияние на радиационный нагрев и выхолаживание в атмосфере с соответствующими вариациями ее циркуляции и температурного режима [Александров, 1982; Брасье, 1987].

Предполагается, что наблюдаемые изменения климата и газового состава атмосферы могут быть в значительной степени обусловлены антропогенным воздействием на окружающую среду [IPCC, 2001; WMO, 2003]. 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 [Geller, 2002; Jackman et al., 1996]. Одним из подобных естественных факторов является одиннадцатилетний цикл солнечной активности, в процессе которого потоки солнечной радиации в ультрафиолетовой области солнечного спектра могут значительно изменяться от минимума к максимуму солнечной активности [Lean, 2000; Lean et al., 1997; Rottman, 2000]. Солнечная активность является природным фактором, который может оказать влияние как на физические, так и на химические процессы в атмосфере, а обратные связи между этими процессами могут существенно изменить масштаб и даже направление влияния солнечной активности на тепловой режим и газовый состав атмосферы.

Изучению влияния солнечной активности на изменения структуры и состава атмосферы в последнее время уделялось значительное внимание [Geller, 2002; Jackman et al., 1996; Логинов, 1980; Ракипова, 1977; Смышляев, 2005; Shindel et al., 1999]. Результаты этих, как экспериментальных, так и теоретических, исследований показали, что в основном при увеличении солнечной активности от минимума к максимуму одиннадцатилетнего цикла отмечается увеличение температуры и содержания озона. Однако в определенных ситуациях отмечается и уменьшение температуры, и сокращение содержания озона [Tourpali et al., 2003; Кривоуццкий, 1995].

Одним из факторов, который может привести к корректировке генеральной положительной тенденции реакции температуры и содержания озона на увеличение солнечной активности вплоть до смены знака эффекта, может быть обратная связь между одновременным воздействием изменений солнечной активности на нагрев атмосферы и скорости химических реакций. Подобные взаимосвязи в последнее время исследуются с использованием интерактивных химико-климатических моделей (ХКМ) [Tourpali et al., 2003; Rozanov et al., 2004; Eyring et al., 2005], однако природа одновременного воздействия солнечной активности на радиационный режим, динамику и химию атмосферы еще изучена недостаточно. В настоящей работе делается попытка исследовать чувствительность температуры и содержания озона в атмосфере на изменения спектральных потоков солнечной радиации, вызванные солнечной активностью, путем проведения численных экспериментов с химико-климатической моделью нижней и средней атмосферы.

Главной целью настоящей работы является исследование неявного воздействия изменения солнечной активности на изменение климата за счет обратных связей между изменением содержания атмосферных газов, температуры и циркуляции атмосферы путем проведения численных экспериментов с трехмерной интерактивной химико-климатической моделью с использованием данных спутниковых измерений об изменчивости спектральных потоков солнечной радиации.

Методология

Солнечное излучение дает практически всю энергию, управляющую физическими и химическими процессами в земной атмосфере. Нагрев атмосферы в результате поглощения газами и аэрозолем солнечного излучения инициирует динамические процессы разного масштаба, определяющие перенос массы и тепла в атмосфере. С другой стороны, фотодиссоциация атмосферных газов в результате поглощения солнечной радиации дает начало химическим процессам образования и разрушения озона и влияющих на него газов [Александров, 1992; Брасье, 1987]. Следовательно, изменения величины потоков солнечной энергии, достигающей земной атмосферы, потенциально могут повлиять как на химическое образование и разрушение атмосферного озона, так и на его перенос атмосферными потоками массы.

На основании наблюдений за количеством солнечных пятен было установлено существование 11-летнего цикла изменения солнечной активности. Инструментальные измерения вариаций интенсивности потоков солнечной радиации появились сравнительно недавно. Изменения интегрального потока (по всем длинам волн) невелики и составляют десятые доли процента [Александров, 1992; Брасье, 1987; Смышляев, 2005]. Однако излучение в ультрафиолетовой области спектра меняется гораздо сильнее по сравнению с изменением полного потока. 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 до 20 % при длинах волн менее 200 нм и до 10 % – в диапазоне 200–300 нм [Lean, 2000; Lean et al., 1997; Rottman, 2000]. Учитывая тот факт, что ультрафиолетовая часть спектра является определяющей для фотохимии озона и важной в формировании нагрева атмосферы, подобные изменения солнечной радиации могут привести к существенным возмущениям фотохимических и радиационных процессов в озоносфере, а следовательно, и к изменению динамических процессов в атмосфере.

На пространственно-временное распределение озона, так же как и других малых газовых составляющих атмосферы, оказывает влияние такой важный фактор, как изменение температуры, от которой зависят скорости многих химических процессов, влияющих на образование и разрушение озона. Вместе с тем

изменение концентрации озона в результате тех или иных возмущений само влияет на колебания температуры, поскольку озон поглощает УФ излучение Солнца, являющееся источником тепла в стратосфере.

Способность инициированных солнечной активностью изменений солнечного излучения одновременно воздействовать на оба фактора, определяющих пространственно-временное распределение озона, т.е. на атмосферную химию и динамику, создает благоприятную возможность для исследования роли обратных связей между химическими, динамическими и радиационными процессами в формировании наблюдаемой изменчивости содержания озона. Моделируя сначала раздельное, а затем совместное влияние изменений солнечной радиации на фотохимию и динамику атмосферы с соответствующими изменениями температуры и содержания озона с учетом и без учета обратных связей между физическими и химическими процессами, можно оценить насколько сильно учет обратных связей может изменить расчетные значения температуры и концентрации озона. В настоящей работе для оценки изменений температуры и газового состава атмосферы при изменении потоков УФ радиации, обусловленных солнечной активностью, была использована глобальная трехмерная интерактивная модель химии и климата, состоящая из интерактивно связанных трехмерных моделей газового состава (МГС) РГГМУ [Smyshlyaev et al., 1998] и общей циркуляции атмосферы (МОЦА) Института вычислительной математики РАН [Алексеев, 1998; Галин, 2003, Володин, 2006].

Особенность используемой модели состоит в интерактивном обмене расчетных данных МОЦА и МГС на каждом шаге по времени, что позволяет учитывать взаимодействие радиационных, химических и динамических процессов в атмосфере и исследовать обратные связи между содержанием радиационно-активных малых газов и атмосферным переносом. Рассчитанные в МГС распределения содержания озона учитываются в МОЦА при расчете нагрева и выхолаживания атмосферы, которые оказывают определяющее воздействие на вычисляемые в МОЦА температуру и скорости ветра. В свою очередь расчетные значения температуры и ветра передаются в МГС, где они определяют скорости химических реакций и атмосферный перенос малых газов атмосферы соответственно. Детали взаимодействия МГС и МОЦА в рамках совместной химико-климатической модели, а также сравнение результатов расчетов данной ХКМ с наблюдениями приведены в [Галин, 2007].

Для исследования влияния изменчивости потоков солнечной радиации на газовый состав и температуру атмосферы были проведены численные эксперименты по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в течение периода эксперимента АМIP-2 (1979–1995 гг.). Описание сценариев модельных экспериментов, цели и методики приведены в табл. 1. Нижние граничные условия в модели задаются на основании данных ВМО (потоки газовых примесей с земной поверхности). Температура поверхности океана и площадь покрытия льдом – по данным эксперимента АМIP-2. Для каждого сценария бы-

ли проведены два расчета на весь период эксперимента АМІР-2: один со спектральными потоками солнечной радиации, соответствующими минимальной солнечной активности, а второй – максимальному уровню солнечной активности, с разницей между потоками, определяемой данными измерений.

Таблица 1

Описание численных экспериментов

№	Цель – исследование	Интер-активный обмен между МОЦА и МГС	Методика численных экспериментов	Примечания	
1	Влияние солнечной активности на фотохимию газов без учета обратных связей	–	В фотохимической модели потоки солнечной радиации в спектральном диапазоне 175–450 нм изменяются в соответствии с данными рис. 1 для минимума (максимума) солнечной активности	Высотно-широтная изменчивость концентрации озона (%) от минимума к максимуму солнечной активности	Рис. 1
				Изменение температуры не происходит	
2	Совместное влияние на фотохимию атмосферных газов и на изменение нагрева атмосферы	+	Изменения в фотохимической модели и в радиационном блоке модели общей циркуляции	Высотно-широтная изменчивость концентрации озона (%)	Рис. 2
				Высотно-широтная изменчивость температуры (К)	Рис. 3
				Изменение общего содержания озона (с.Д., %) от минимума к максимуму солнечной активности	Рис. 4

На первом этапе численных экспериментов исследуется отдельное влияние солнечной активности только на фотохимию атмосферных газов без учета обратных связей с атмосферной динамикой. Влияние солнечной активности на изменение скоростей фотодиссоциации атмосферных газов учитывается в фотохимической модели. Для этого интенсивность потоков солнечной радиации в спектральном диапазоне 175–450 нм уменьшалась (увеличивалась) для минимума (максимума) солнечной активности на половину амплитуды. Эти данные получены путем комбинирования результатов спутниковых наблюдений в течение двух последних 11-летних циклов (1979–2000 гг.) [Lean, 2000; Lean et al, 1997; Rottman, 2000]. Влияние солнечной активности на газовый состав оценивается путем сравнения полученных квазистационарных составов атмосферы для высокого и низкого уровней солнечной активности.

Изменение потоков солнечной радиации на разных фазах солнечной активности непосредственно оказывает влияние на скорости нагрева атмосферы, рассчитываемые в модели общей циркуляции. Поэтому на втором этапе модельных

экспериментов рассматривается совместное влияние изменения солнечной активности от минимума к максимуму на атмосферный озон и температуру как посредством влияния изменения интенсивности солнечной радиации на изменение скоростей фотохимических реакций, так и на изменение нагрева атмосферы. Для учета влияния солнечной активности на нагрев атмосферы в радиационном блоке МОЦА спектральные характеристики внеатмосферной солнечной радиации уточняются для минимального и максимального уровней 11-летнего солнечного цикла в соответствии с экспериментальными данными. В этих экспериментах также исследуется явное и неявное воздействие солнечной активности на температуру и газовый состав атмосферы в результате отдельного и совместного влияния на изменения скоростей фотохимических реакций и скорости нагрева.

Результаты модельных расчетов

Результаты сравнения модельных расчетов динамики изменения температуры, озона и других малых газов с измерениями и другими моделями показали, что модель достаточно точно воспроизводит как внутригодовые пространственно-временные распределения исследуемых характеристик, так и их межгодовую изменчивость. Результаты этих экспериментов по тестированию разработанного авторами модельного комплекса ССМ детально приведены в [Галин, 2007; Смышляев, 2010а, Смышляев, 2010б]. Проведенная валидация модели позволила сделать заключение о том, что блоки химии и динамики, а также их взаимодействие описаны в ССМ корректно, что позволяет использовать модель для дальнейшего исследования основных факторов наблюдаемой изменчивости атмосферного озона и температуры, а также прогноза их вариаций в будущем.

После завершения проверки способности модели воспроизводить наблюдаемые особенности распределения содержания атмосферных газов и температуры были проведены модельные эксперименты по исследованию влияния изменчивости спектральных потоков солнечной радиации, обусловленных солнечной активностью, на содержание озона и температуру атмосферы. В первом цикле экспериментов исследовалось изменение содержания озона как результат влияния солнечной активности на изменение скоростей фотодиссоциации газов. При этом обратные связи между изменением озона, радиационным нагревом и динамикой не учитывались.

На рис. 1 приведена высотно-широтная изменчивость концентрации озона при изменении потоков солнечной радиации от минимума к максимуму солнечной активности по результатам первого цикла экспериментов. Увеличение потоков солнечной радиации ведет к ускорению фотолиза всех подверженных фотодиссоциации атмосферных газов. В результате этого, с одной стороны, увеличивается продукция озона в результате фоторазрушения молекулярного кислорода, а с другой – ускоряются процессы каталитического разрушения озона в

азотных и водородных циклах. Однако, как было показано авторами ранее [Смышляев, 2005], суммарный эффект заключается все же в преобладании ускорения продукции озона над увеличением его разрушения.

Наибольший отклик озона на изменение солнечной активности, резко возрастающий с высотой, отмечается в мезосфере на высотах выше 70 км, что является понятным с учетом направления переноса солнечной радиации в земной атмосфере. Следует отметить, однако, что концентрации озона на этих высотах незначительны и не вносят существенного вклада в его общее содержание. Более интересным является эффект образования локального максимума изменения содержания озона на высотах 30–50 км, т.е. в верхней стратосфере, где находится большая часть атмосферного содержания озона. По абсолютной величине этот локальный максимум достигает 4 % чуть ниже 40 км в средних широтах летнего полушария. Образование этого максимума является результатом комбинации высотной изменчивости скоростей разрушения озона в азотных и водородных циклах.

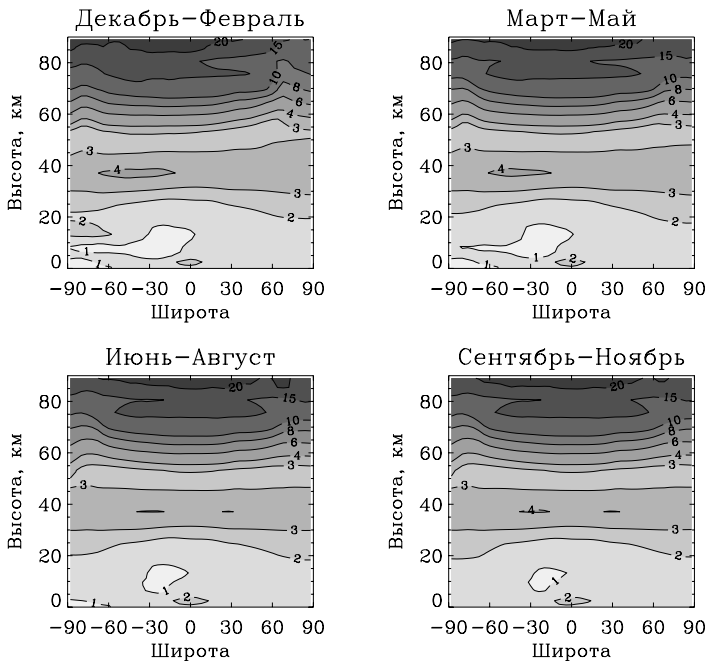


Рис. 1. Высотно-широтная изменчивость концентрации озона в разные сезоны (%) как результат влияния солнечной активности на химию без обратной связи

На высотах 20–40 км разрушение озона происходит преимущественно в каталитических циклах с участием радикалов азота, где определяющей является реакция атомарного кислорода с двуокисью азота [Брасье, 1987;]. Увеличение интенсивности потоков солнечной радиации способствует перераспределению азотосодержащих газов внутри семейства «нечетного азота», в результате чего в

атмосфере содержание двуокиси азота уменьшается, так как она интенсивно разрушается в результате фотодиссоциации.

На высотах ниже 20 км и выше 45 км определяющую роль играет разрушение озона в водородных каталитических циклах [Брасье, 1987;]. При увеличении внеатмосферных потоков солнечной радиации в верхней стратосфере интенсифицируются процессы образования радикалов водорода, в результате чего возрастает и скорость разрушения озона. Также увеличение интенсивности солнечной радиации способствует увеличению скорости разрушения озона в верхней стратосфере в реакциях с участием хлорных и бромных газовых составляющих. В нижней стратосфере и тропосфере с ослаблением радиационных потоков изменение концентрации озона уменьшается, но остается положительным вследствие атмосферного переноса. В тропической зоне у земной поверхности наблюдается локальный максимум увеличения концентрации озона.

В целом положительная реакция содержания озона на изменение скоростей фотодиссоциации при увеличении радиационных потоков от минимума к максимуму солнечной активности сохраняется в течение всех сезонов, на всех широтах и высотах, при этом изменение концентрации озона плавно меняется по высоте и широте. Следует заметить, что из-за отсутствия обратного влияния изменения содержания озона на радиационный режим атмосферы изменений температуры в данной серии модельных экспериментов не происходит, поэтому и не анализируется. Подробное исследование высотных особенностей влияния изменчивости потоков солнечного излучения на изменение концентрации озона, скоростей его образования и разрушения в разных широтных зонах без учета обратных связей между химией и динамикой атмосферы приведено в работе [Смышляев, 2005].

Во второй серии модельных экспериментов исследовалось совместное влияние изменения солнечной активности от минимума к максимуму на атмосферный озон и температуру как посредством влияния изменения интенсивности солнечной радиации на изменение скоростей фотохимических реакций, так и на изменение нагрева атмосферы с учетом обратных связей. На рис. 2 приводится высотно-широтное распределение изменения концентрации озона как результат влияния солнечной активности на химию и динамику с обратной связью. В мезосфере (выше 60 км) характер изменения концентрации озона остался прежним (сравнить с рис. 1). Однако в средней и нижней стратосфере полный учет обратных связей между химией, радиацией и динамикой привел даже к смене знака эффекта в некоторых регионах. В частности, в отличие от предыдущей серии модельных экспериментов, в данном варианте отмечается значительное уменьшение содержания озона и температуры (рис. 2) в нижней стратосфере полярных районов и увеличение содержания озона в нижней стратосфере тропических широт.

Главным фактором, определяющим такое резкое изменение содержания озона, можно предположить изменение температуры как в стратосфере, так и

в мезосфере, что не наблюдалось в предыдущей серии экспериментов, когда не учитывалось влияние изменения потоков солнечной радиации непосредственно на нагрев атмосферы. При таких вариациях нагрева на всех высотах, в отличие от предыдущего эксперимента, где нагрев менялся только там, где менялось содержание озона, меняются условия образования и распространения планетарных и гравитационных волн [Алексеев, 1998], в результате чего циркумполярный вихрь становится более устойчивым и продолжительным во времени в обоих полушариях.

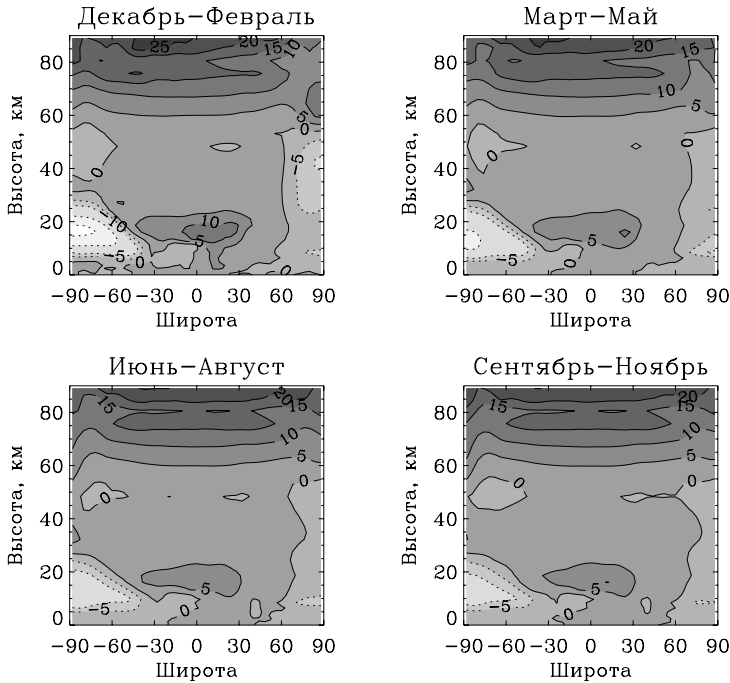


Рис. 2. Высотно-широтная изменчивость концентрации озона в разные сезоны (%) как результат влияния солнечной активности на химию и динамику с обратной связью

Таким образом, большая изолированность полярных регионов от средних широт приводит к более продолжительному периоду выхолаживания нижней стратосферы, что отмечается на рис. 3. В условиях более холодной стратосферы для случая с максимальной солнечной активностью более продолжительное время существуют полярные стратосферные облака. В результате этого процессы хлорной и бромной активации на облаках такого типа приводят к более интенсивному разрушению озона после возвращения солнца по окончании полярной ночи. Следует отметить, что процессы развития циркумполярного вихря оказываются более эффективными для формирования поля озона и температуры в полярных районах, чем потенциальное повышение температуры в результате увеличения концентрации озона в ответ на изменение солнечной активно-

сти от минимума к максимуму 11-летнего цикла, рассмотренное во второй серии модельных экспериментов, когда эффект в полярных районах был положительным весь год.

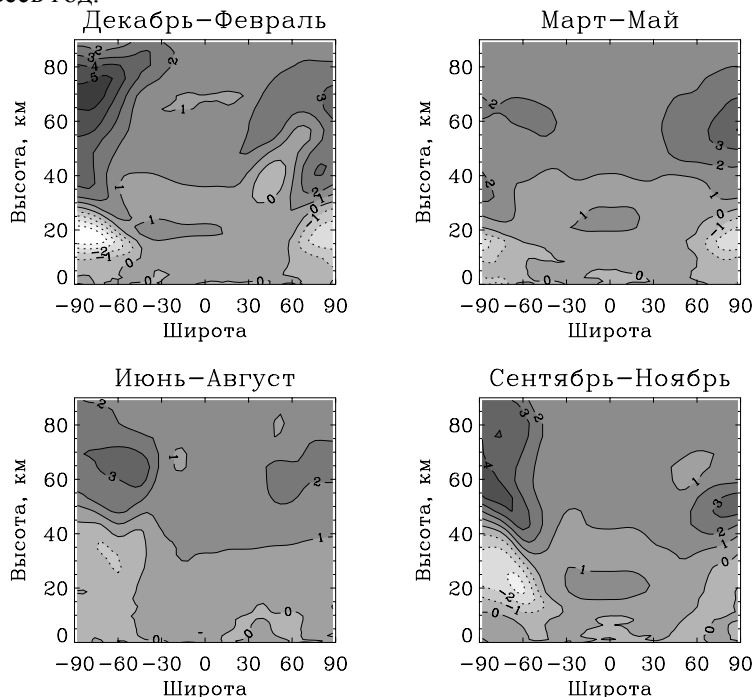


Рис. 3. Высотно-широтная изменчивость температуры (K) как результат влияния солнечной активности на химию и динамику с обратной связью

На рис. 4 приведено изменение общего содержания озона как результат влияния изменения солнечной активности от минимума к максимуму на динамику и химию с обратной связью. В экваториальной части отмечается малоградиентное поле изменения общего содержания озона от минимума к максимуму солнечной активности. В течение года вариации общего содержания озона в тропической зоне меняются мало и составляют около 2,5 %. Наибольшие изменения общего содержания озона отмечаются полярных районах. При этом разные условия формирования циркумполярного вихря в Северном и Южном полушариях приводят к качественно разному изменению содержания озона. В Южном полушарии наблюдается эффект увеличения продолжительности циркумполярного вихря, в результате чего максимальное уменьшение содержания озона отмечается в ноябре-январе, когда озоновая дыра уже должна затягиваться [Смышляев, 2010a]. В Северном же полушарии максимальный эффект наблюдается в марте-апреле, т.е. когда только формируются озоновые минидыры. Таким образом, если в Южном полушарии изменение солнечной активности с учетом обратных связей может привести к увеличению продолжитель-

ности озоновых дыр, то в Северном полушарии – к увеличению глубины озоновых мини-дыр.

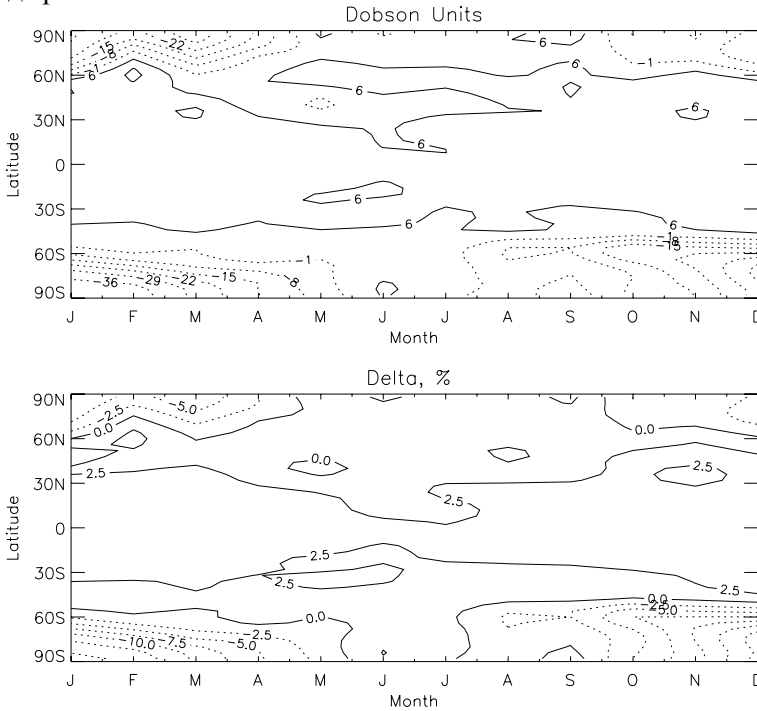


Рис. 4. Изменение общего содержания озона как результат влияния солнечной активности на динамику и химию с обратной связью

Заключение

Представлены результаты модельных экспериментов с трехмерной интерактивной химико-климатической моделью нижней и средней атмосферы, выполненных с целью исследования влияния обратных связей между химическими, радиационными и динамическими процессами на примере влияния вариаций потоков солнечной радиации, вызванных изменением солнечной активности от минимума к максимуму 11-летнего цикла, на содержание озона и температуру атмосферы. Проведены численные эксперименты с ССМ, в которых учитывалось раздельное и совместное влияние вариаций потоков солнечной радиации на изменение скоростей фотохимических реакций и нагрев в атмосфере. Изменение солнечной активности задавалось на основании результатов спутниковых измерений с учетом спектральной зависимости изменчивости потоков солнечного излучения в течение 11-летнего цикла солнечной активности.

Сопоставление результатов численных экспериментов с раздельным и совместным моделированием влияния изменения солнечной активности на фотохимию, радиацию и циркуляцию атмосферы показало, что обратные связи мо-

гут приводить как к количественным, так и качественным изменениям содержания озона и температуры. Исследование высотных особенностей влияния изменчивости потоков солнечного излучения на содержание озона и температуру атмосферы выявило, что изменение потока солнечной радиации от минимума к максимуму солнечного цикла содержание атмосферного озона и температуры может не только увеличивать, но и уменьшать. При этом неявное воздействие солнечной активности на изменения климата за счет обратных связей усиливает пространственную неоднородность этих изменений.

Полученные результаты показали важность учета обратных связей между изменением содержания атмосферных газов, температуры и циркуляции атмосферы на примере влияния солнечной активности. При этом следует заметить, что полученные в настоящей работе выводы требуют дальнейшего углубленного исследования и экспериментальной проверки путем сравнения результатов измерений содержания озона и температуры в годы с различным уровнем солнечной активности, а также расчеты с использованием реальной изменчивости уровня солнечной активности от года к году. Подобная работа планируется авторами для выполнения в ближайшем будущем.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-05-00916а).

Литература

1. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 288 с.
2. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН № 2086-В98, 1998. – 180 с.
3. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 291 с.
4. Володин Е.М., Дианский Н.А. Воспроизведение изменений климата в 19-22 столетиях с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН, сер. ФАО, 2006, т.42, № 3, с. 291–306.
5. Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П. Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // Метеорология и гидрология, 2003, № 5, с. 13–23.
6. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М., Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, сер. ФАО, 2007, т. 43. № 4, с. 347–452.
7. Криволицкий А.А., Кидиярова В.Г., Иванова И.Н., Глазков В.Н., Фомина Н.Н. Проявление процессов солнечной активности в озоносфере Земли // Изв. РАН, сер. ФАО, 1995, 31, 1, 53–56.
8. Логинов В.Ф., Ракипова Л.Р., Сухомазова Г.И. Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 80 с.
9. Ракипова Л.Р. Влияние солнечной активности на циркуляцию и температуру стратосферы. – В кн.: Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977, с. 3–9.
10. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Изв.РАН, сер. ФАО, 2004, т. 40, № 2, с. 211–222.

11. 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.
12. Смышляев С.П., Галин В.Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М.А. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // *Изв. РАН, сер. ФАО*, 2010, т. 46, № 3, с. 3–15.
13. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // *Изв. РАН, сер. ФАО*, 2010, т. 46, № 4, с. 5–17.
14. Eyring V., N.R.P. Harris, M. Rex, T.G. Shepherd, D.W. Fahey, G.T. Amanatidis, J. Austin, M.P. Chipperfeld, M. Dameris, P.M. De F. Forster, A. Gettelman, H.F. Graf, T. Nagashima, P.A. Newman, S. Pawson, M.J. Prather, J.A. Pyle, R.J. Salawitch, B.D. Santer, and D.W. Waugh. A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models. – *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2005, 86, 1117–1133.
15. Geller M.A., Smyshlyaev S.P. A Model Study of Total Ozone Evolution 1979–2000 – The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects, – *Geophys. Res. Letters*, 29(22), 2048, doi: 10.1029/2002GL015689, 2002.
16. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, 881 p., Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2001.
17. Jackman C.H., Fleming E.L., Chandra S., Considine D.B., Rosenfield J.E. Past, present, and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends // *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. 101, p. 28753–28767.
18. Lean J. Evolution of the Sun’s spectral irradiance since the Maunder Minimum, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2,425–2,428, 2000.
19. Lean J.L., Rottman G.J., Lee Kyle H., Woods H.N., Hickey J.R., Puga L.C. Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet (200–400 nm) // *J. Geophys. Res.*, 102, 29,939–29,956, 1997.
20. McCormack J.P., Hood L.L., Nagatani R., Miller A.J., Planet W.G., McPeters R.D. Approximate separation of volcanic and 11-year signals in the SBUV-SBUV/2 total ozone record over the 1979–1995 period. – *Geophys. Res. Lett.*, 1997, vol. 24, p. 2729–2732.
21. Rozanov E.V., Schlesinger M.E., Egorova T.A., Li B., Andronova N. and Zubov V.A. (2004) Atmospheric response to the observed increase of solar UV radiation from solar minimum to solar maximum simulated by the UIUC Climate-Chemistry Model // *J. Geophys. Res.* 109, D01110, doi:10.1029/2003JD003796.
22. Rottman G.J. Variations of solar ultraviolet irradiance observed by the UARS SOLSTICE – 1991 to 1999. – *Space Sci. Rev.*, 2000, 94, 83–91.
23. Shindel D., Rind D., Balachandran N., Lean J., Lonergan P. Solar cycle variability, ozone and climate. – *Science*, 1999, vol. 284, p. 305–308.
24. Smyshlyaev S.P., Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A. A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation // *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, p. 28373–28387.
25. Tourpali K., C.J.E. Schuurmans, R. van Dorland, B. Steil and C. Brühl (2003): Stratospheric and tropospheric response to enhanced solar UV radiation: A model study, *Geophys. Res. Lett.*, 30(5), 1231, doi: 10.1029/2002GL016650.
26. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47 – Geneva, Switzerland, 2003.