

Т.В. Суходолов, П.А. Блаkitная, О.П. Боровская, С.П. Смышляев

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ СТРАТОСФЕРЫ**

T.V. Sukhodolov, P.A. Blakitnaya, O.P. Borovskaya, S.P. Smyshlyaev

**A MODEL STUDY OF THE SIMULTANEOUS STRATOSPHERIC OZONE AND
TEMPERATURE VARIABILITY**

Трехмерная интерактивная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для исследования влияния взаимосвязи химических и физических процессов на межгодовую изменчивость температуры и содержания озона в стратосфере. Результаты численных экспериментов с раздельным и совместным влиянием разных факторов 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, стратосфера, влияющие факторы, обратные связи.

A three-dimensional interactive chemistry climate model of the lower and middle atmosphere is used to study impacts of interactions between chemical and physical processes in the atmosphere on interannual temperature and atmospheric ozone variability in the stratosphere. The model results have shown that feedbacks between ozone and temperature changes can have both quantitative and qualitative impact on the temperature and atmospheric ozone variability.

Key words: ozone, temperature, stratosphere, impact factors, feedbacks

Наблюдаемые в последнее время изменения климата [1] и газового состава атмосферы [2] происходят одновременно и могут быть взаимосвязаны. Увеличение или уменьшение температуры воздуха может привести к вариациям скоростей химических реакций с результирующим изменением содержания атмосферных газов. С другой стороны, 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 с соответствующими вариациями ее циркуляции и температурного режима [3].

Атмосферный озон, концентрация которого в воздухе на различных высотах измеряется лишь миллионными и даже миллиардными долями, является, тем не менее, одним из важнейших атмосферных газов в силу своих оптических и химических свойств. Поглощение озоном биологически активного компонента ультрафиолетовой солнечной радиации служит основным механизмом, регулирующим интенсивность этой радиации у поверхности Земли и, таким образом, наличие озонового щита является жизненно важным для существования разнообразных форм жизни на Земле. Поглощение озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в инфра-

красной области спектра (в окрестности 9,6 мкм) служат важнейшими составляющими радиационного и термического баланса атмосферы [4].

Наличие стратосферного озонного слоя радикальным образом влияет на температурную стратификацию стратосферы и, тем самым, оказывает важное воздействие на динамические процессы и климат стратосферы. Однако если раньше можно было говорить о явной зависимости между изменением содержания озона и изменением температуры стратосферы, то результаты наблюдений последних десятилетий заставляют пересмотреть причинно-следственные связи между стратосферными процессами и вклад каждого из них в общую картину наблюдаемых аномальных изменений.

Механизмы, ответственные за эти изменения, должны изучаться с помощью численного моделирования. Для теоретического исследования изменчивости циркуляции и температурного режима атмосферы используются численные математические модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) [5-7]. При этом при применении МОЦА для изучения проблемы глобального потепления задаются фиксированные поля концентрации озона и других радиационно-активных газов, необходимые для расчета нагрева атмосферы, который управляет атмосферной циркуляцией. С другой стороны, при использовании моделей газового состава (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 моделей общей циркуляции атмосферы. При этом обратное влияние рассчитываемых полей содержания озона на динамику, как правило, не учитывается [8, 9].

Взаимосвязь моделей общей циркуляции атмосферы и газового состава до недавнего времени не рассматривалась, хотя и является важной. Оптимальным для исследования изменений климата является химико-климатическое моделирование, которое позволяет учесть взаимодействия атмосферных физических и химических процессов [10]. Несмотря на то, что модельному исследованию этих процессов в последнее время уделялось значительное внимание, при этом связь между изменением газового состава и тепловым режимом средней атмосферы до конца не ясна.

Главной целью настоящей работы является исследование взаимосвязи между наблюдаемыми изменениями содержания озона и температуры стратосферы и процессами, влияющими на эти изменения с помощью трехмерной химико-климатической модели.

Методология

Для достижения цели настоящего исследования сначала были выделены основные физические и химические процессы, определяющие долгопериодную изменчивость содержания атмосферных газов и температуры. К фундаментальным процессам, ответственным за состояние и эволюцию структуры и состава атмосферы, относятся химические реакции, процессы переноса излучения и тепла, а также динамика атмосферы. Эти процессы не являются независимыми и при любом возмущении (например, при изменении солнечного потока, извержении вулканов и др.) проявляются обратные связи. Возникает взаимодействие различных процессов [3].

Для выявления причин наблюдаемой межгодовой изменчивости содержания озона и других атмосферных газов и температуры необходимо исследовать влияние следующих факторов: выбросы химически активных газов с поверхности земли, из-

менение содержания углекислого газа, изменение температуры поверхности океана, одиннадцатилетний цикл солнечной активности [11], изменение содержания в атмосфере аэрозолей в результате вулканической активности [12]. Предполагается, что на аномальное поведение температуры стратосферы последних десятилетий могло существенно повлиять изменение температуры поверхности океана и увеличение концентрации углекислого газа.

Для проведения подобных модельных экспериментов необходимо использовать интерактивную химико-климатическую модель, способную адекватно описывать фундаментальные процессы, ответственные за состояние и эволюцию структуры и газового состава атмосферы, с учетом взаимного влияния изменений температуры и содержания озона друг на друга. В работе используется совместная глобальная трехмерная химико-климатическая модель, разработанная в Институте вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН) и Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете (РГГМУ). Особенность используемой модели состоит в интерактивном обмене расчетных данных МОЦА и МГС, что позволяет учитывать взаимодействия фотохимических и динамических процессов в атмосфере на каждом модельном шаге по времени (обратные связи между содержанием радиационно-активных малых газов и атмосферным переносом).

Разрешение в атмосферном блоке составляет 5° по долготе, 4° по широте и 39 у-уровней по вертикали от поверхности земли до высоты 90 км. В модель общей циркуляции атмосферы включены все основные физические процессы, связанные с переносом влаги и с изменениями температуры в атмосфере, в пограничном слое и в почве, с воздействием гравитационных волн, с орографическими эффектами, влиянием облаков и радиации. Уравнения гидротермодинамики решаются на сетке «С» по классификации Аракавы конечно-разностным методом. В радиационном блоке в коротковолновой части спектра рассматривается 18 спектральных интервалов, а в длинноволновой части — 10 спектральных интервалов. Прогностическими переменными являются вертикальные и горизонтальные компоненты скорости ветра, температура, влажность и приземное давление, которые используются в качестве входных параметров для модели газового состава атмосферы.

Фотохимическая модель рассматривает пространственно-временную изменчивость 74 основных малых газов, участвующих в 123 газофазных и 23 гетерогенных химических реакциях и 51 процессах фотодиссоциации. Фотохимическая схема химических реакций включает все основные реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние как химических процессов на образование и эволюцию озона, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяют исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов как в стратосфере, так и в тропосфере [13].

С химико-климатической моделью были проведены численные эксперименты по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в 1979–2003 гг. Нижние граничные условия в модели задаются на основании данных ВМО (потoki газовых примесей с земной поверхности) [2]. Температура поверхности океана и площадь покрытия льдом — по данным эксперимента AMIP2 (Atmospheric

Model Intercomparison Project). 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 модельных расчетов

Для исследования влияния изменчивости параметров выделенных процессов на газовый состав и температуру стратосферы с химико-климатической моделью было проведено несколько численных экспериментов по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в 1979–2003 гг. Наиболее интересным, в рассматриваемый период, является промежуток с середины 90-х годов и до настоящего времени. После уменьшения, связанного с извержением Пинатубо и минимумом солнечной активности, и реакции на это уменьшение температуры, содержание озона постепенно восстанавливается, а температура остается примерно на том же уровне. Предполагается, что наиболее существенную роль в это время может играть увеличение концентрации CO_2 и изменение температуры поверхности океана.

При исследовании использовалась методика, согласно которой параметры каждого процесса кроме исследуемого в данном численном эксперименте принимались фиксированными на уровне 1979 года. Описание сценариев модельных экспериментов приведено в таблице 1.

Нижние граничные условия (потoki газовых примесей с земной поверхности) и содержание атмосферных аэрозолей в модели задаются на основании данных ВМО.

Таблица 1

Описание численных экспериментов

Предмет исследования	Учет нижних граничных условий	Результат моделирования
Влияние всех процессов одновременно	+	Рис. 1, 2
Влияние потоков с поверхности Земли	+	Рис 5, 6
Влияние аэрозолей	+	Рис 7, 8
Влияние температуры поверхности океана (ТПО), без учета всех факторов	-	Рис 9, 10
Влияние всех факторов без учета ТПО	+	Рис. 11, 12
Влияние двуокиси углерода	-	Рис. 13, 14

Температура поверхности океана и площадь покрытия льдом - по данным эксперимента AMIP.

Основной целью численных экспериментов с химико-климатической моделью являлось исследование влияния параметров выбранных процессов на газовый состав и температурный режим атмосферы. Однако перед проведением подобных расчетов необходимо убедиться, что используемый комплекс моделей газового состава и общей циркуляции атмосферы корректно воспроизводит основные наблюдаемые

особенности пространственно-временного распределения содержания атмосферных газов, температуры и скоростей атмосферного переноса. Для решения этой задачи был выполнен эволюционный модельный эксперимент, в котором исследовалась изменчивость состава и структуры атмосферы с 1979 по 2003 годы.

Результаты экспериментов по тестированию модельного комплекса ХКМ приведены на рис. 1 и 2. Анализ этих результатов показывает, что модель достаточно точно воспроизводит межгодовую изменчивость пространственно-временных распределений исследуемых характеристик. Однако имеет место небольшое занижение содержания озона после извержения Пинатубо в 1991 году и несколько сглаженный профиль температуры, что необходимо будет учитывать в следующих экспериментах. Так же температура слишком соответствует изменению озона. В отличие от измерений, где после спада начала 90х концентрация озона восстанавливается, а температура колеблется примерно на том же уровне, модельная температура начинает расти вслед за озоном, что, возможно, может быть обусловлено как раз занижением и резким переходом от уменьшения к увеличению модельного содержания озона. Но, тем не менее, можно сделать заключение о том, что блоки химии и динамики, а также их взаимодействие в ХКМ описаны довольно корректно, что позволяет использовать модель для дальнейшего исследования основных факторов наблюдаемой изменчивости атмосферного озона и температуры.

Был проведен эксперимент без учета всех факторов для выявления собственной изменчивости атмосферы. Как и предполагалось, и содержание озона и температура остаются примерно на том же уровне с некоторыми колебаниями, обусловленными, скорее всего, волновой активностью атмосферы (рис 5, 3).

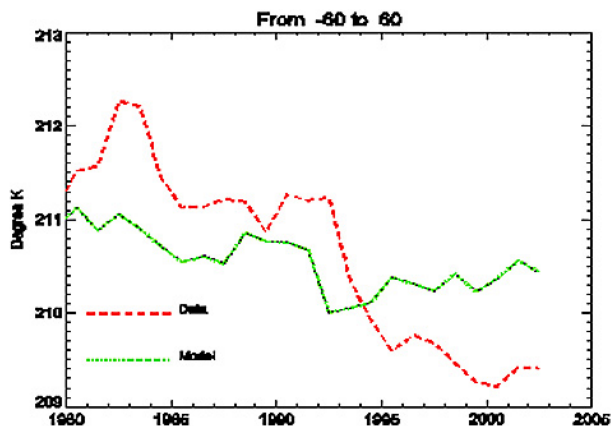


Рис. 1 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом всех влияющих факторов

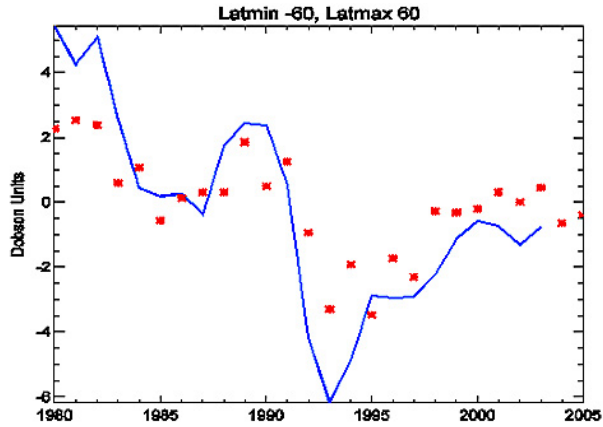


Рис. 2 – Изменчивость содержания озона с учетом всех влияющих факторов

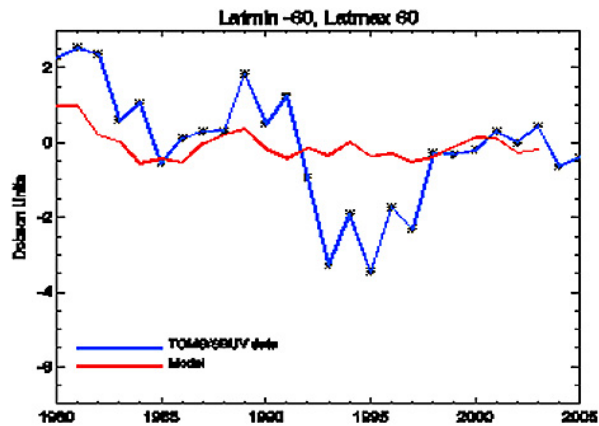


Рис. 3 – Собственная изменчивость содержания озона

Разрушение озона в атмосфере происходит, главным образом, в каталитических циклах с участием азотных, водородных, хлорных и бромных радикалов. Подписание Монреальского протокола в 1988 году позволило существенно сократить выбросы озоноразрушающих веществ. Так на рис. 4 видно, что с начала 90-х годов интенсивность их роста сократилась, перейдя затем в устойчивое состояние с дальнейшим уменьшением.

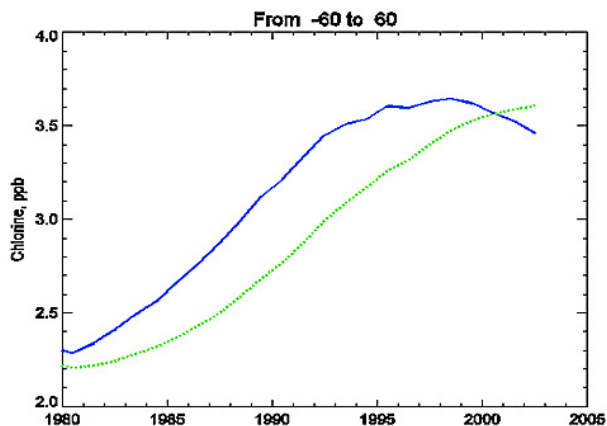


Рис. 4 — Изменчивость выбросов с поверхности Земли хлора и бромапо данным ВМО

Был проведен эксперимент, в котором учитывалось только изменение нижних граничных условий с потоками газовых примесей, для оценки их влияния на содержание озона (рис. 5) и температуру стратосферы (рис. 6). Результаты показали, что газовые примеси активно разрушают озон, формируя основной тренд его изменчивости. Температура стратосферы понижается из-за уменьшения нагрева за счет поглощения озоном ультрафиолета. Но в то же время понижение температуры несколько компенсирует разрушение озона, влияя на скорости химических реакций. Содержание озона плавно уменьшается до середины 90-х годов, а затем начинает понемногу расти, что обусловлено сокращением выбросов и уменьшением скоростей химических реакций из-за понижения температуры стратосферы.

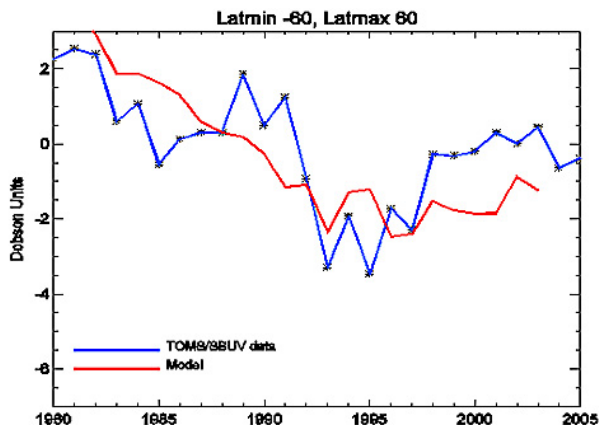


Рис. 5 — Изменчивость содержания озона за счет потоков газовых примесей

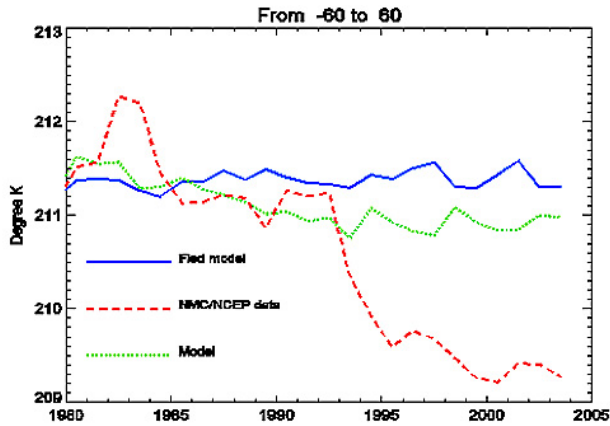


Рис. 6 – Изменчивость температуры стратосферы за счет потоков газов

На рис. 7 и 8 представлены результаты экспериментов по изучению влияния атмосферных аэрозолей на содержание озона и температуру стратосферы. В модельных расчетах учтены потоки газовых примесей и выбросы продуктов извержений вулканов Эль—Чичон (1982 г., Мексика) и Пинатубо (1991 г., Филиппины), которые были самыми мощными в течение рассматриваемого периода времени.

Увеличение количества аэрозолей после крупных извержений приводит как к ослаблению проникающего солнечного излучения за счет рассеяния, так и к увеличению поглощения солнечной радиации и излучения Земли. В результате последнего эффекта наблюдается уменьшение прямого солнечного излучения и увеличение рассеянного. Суммарный эффект всех этих процессов приводит к нагреву атмосферы на высотах стратосферы, что хорошо заметно на рисунках, когда даже на фоне понижения содержания озона из-за его разрушения продуктами извержения, температура стратосферы некоторое время растет, тем самым усиливая разрушение озона.

В целом модель неплохо воспроизводит влияние выбросов аэрозолей, обозначая резкие переходы от минимума к максимуму. Вулканическая активность несомненно является очень важным фактором, но носит больше эпизодический характер, не оказывая особого влияния на общий тренд. К тому же существенное влияние наблюдается лишь в первую половину рассматриваемого нами срока, и в оценке дальнейших, интересующих нас изменений, аэрозоли, как видно, большой роли не играют.

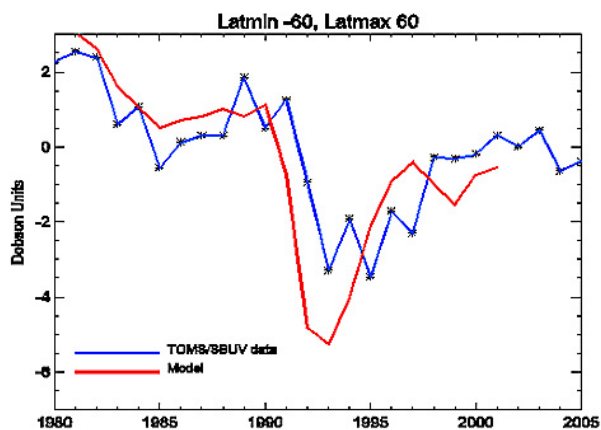


Рис. 7 – Изменение содержания озона при изменении содержания аэрозоля

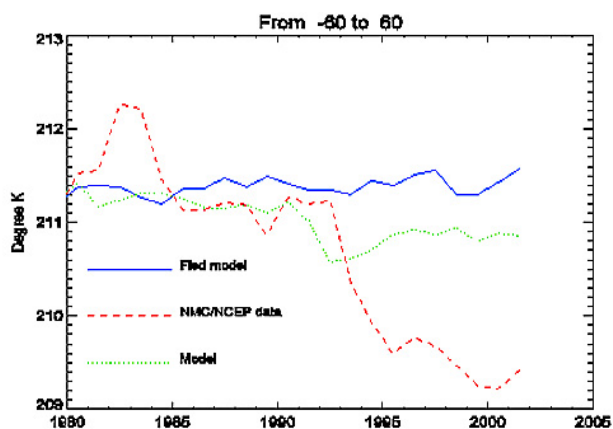


Рис. 8 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом извержений вулканов

С химико—климатической моделью были проведены эксперименты по исследованию влияния изменчивости потоков солнечной радиации, обусловленных солнечной активностью, на содержание озона и температуру стратосферы (рис. 9 и 10). На данном этапе также учитывались нижние граничные условия с потоками газовых примесей.

Выполненные расчеты показали, что изменение содержания озона хорошо соответствует фазам солнечной активности, т.е. отмечается повышение содержания озона при увеличении уровня солнечной активности. Этот положительный отклик озоносферы хорошо заметен в периоды, близкие к 80—му, 90—му и 2000 годам. В результате отмечаются максимальные значения содержания озона за рассматриваемый период, что подчеркивает важность учета цикла солнечной активности.

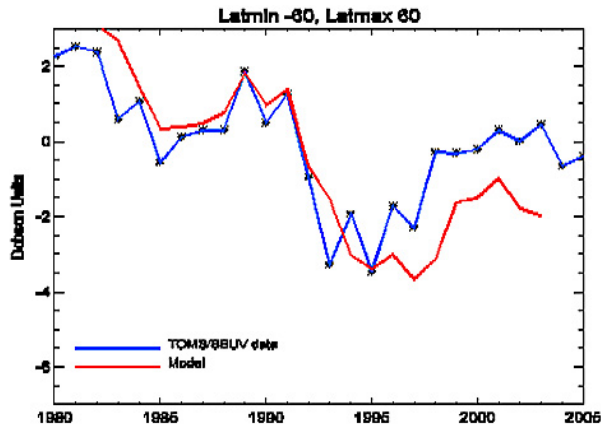


Рис. 9 – Изменчивость содержания озона с учетом потоков солнечной радиации

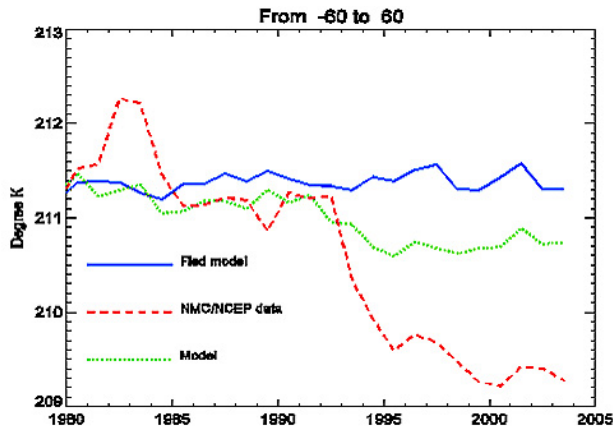


Рис. 10 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом потоков солнечной радиации

Предполагалось, что температура поверхности океана может оказаться одним из факторов, существенно повлиявших на интересующий нас период с середины 90-х и до настоящего времени. Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты с учетом ТПО и исключением всех остальных факторов (рис. 11 и 12) и с учетом всех факторов за исключением ТПО (рис. 13 и 14).

Анализ модельных экспериментов показывает, что ТПО слабо влияет как на температуру стратосферы, так и на содержание озона. У температуры стратосферы появляется слабая тенденция к росту за счет роста ТПО, но на фоне остальных факторов этот вклад не является существенным. Сравнение рис. 12 и 1 позволяет сделать вывод, что океан является источником температурных флуктуаций, которые присутствуют на рис 1, а на рис 12 их нет.

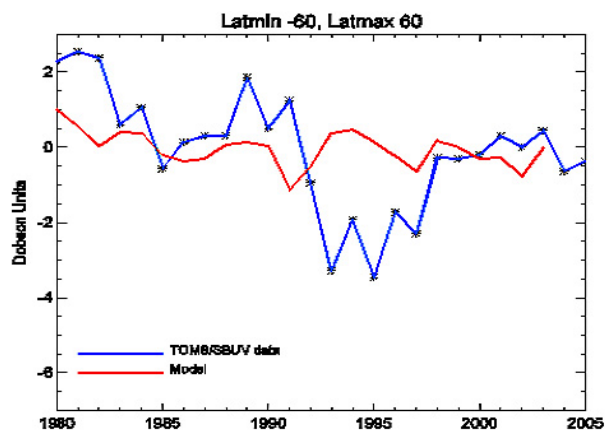


Рис. 11 – Изменчивость содержания озона за счет ТПО.

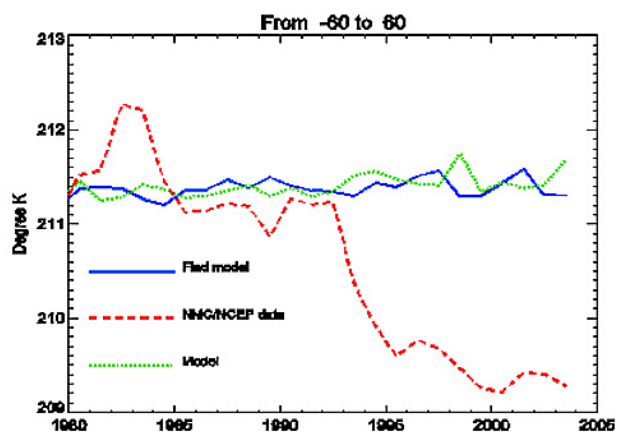


Рис. 12 – Изменчивость температуры стратосферы за счет ТПО

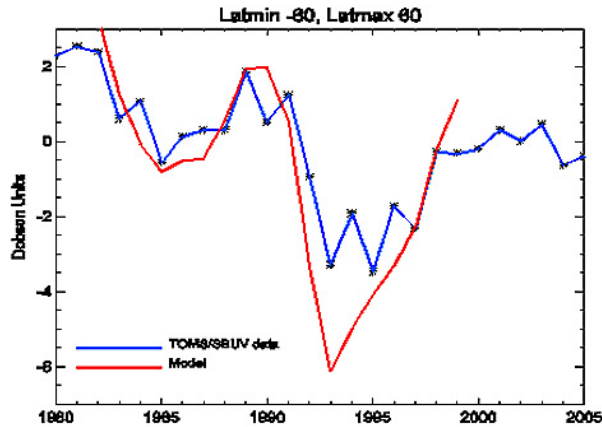


Рис. 13 — Изменение содержания озона с учетом всех факторов за исключением ТПО

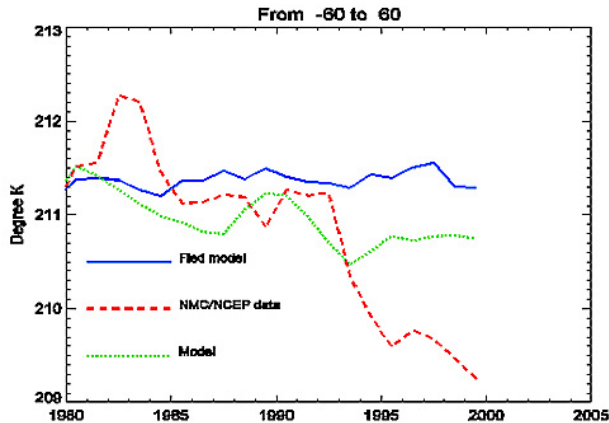


Рис. 14 — Изменчивость температуры стратосферы с учетом всех факторов за исключением ТПО

В последнем эксперименте исследовалось влияние двуокиси углерода на изменения температуры стратосферы и содержания озона. Предполагалось, что увеличение концентрации CO_2 на фоне понижения концентраций фреонов может оказать решающую роль в формировании охлаждения стратосферы, наблюдавшегося с середины 90-х годов.

Однако результаты, приведенные на рис 15 и 16, показывают, что влияние углекислого газа незначительно. Какое-то влияние на температуру, конечно, есть, но результат этого влияния слабо отличается от собственных флуктуаций атмосферы. Не смотря на то, что концентрация CO_2 в атмосфере неуклонно увеличивается, видимо на данный она все же не способна пока оказать заметного влияния. С другой стороны, в модели могут быть не точно или с ошибкой описаны механизмы взаимодействия с CO_2 , либо несовершенны научные представления о том, как нужно их описывать.

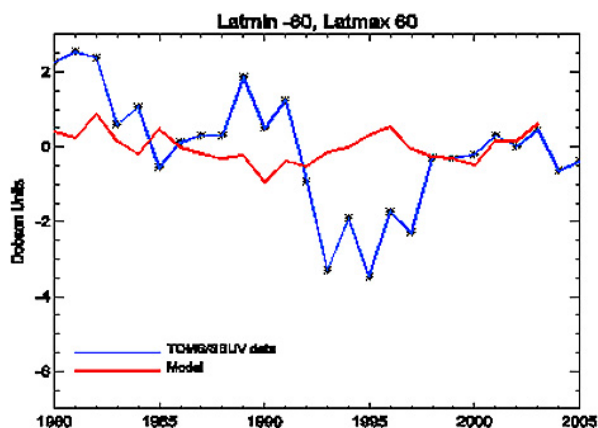


Рис. 15 – Изменчивость содержания озона за счет двуокиси углерода

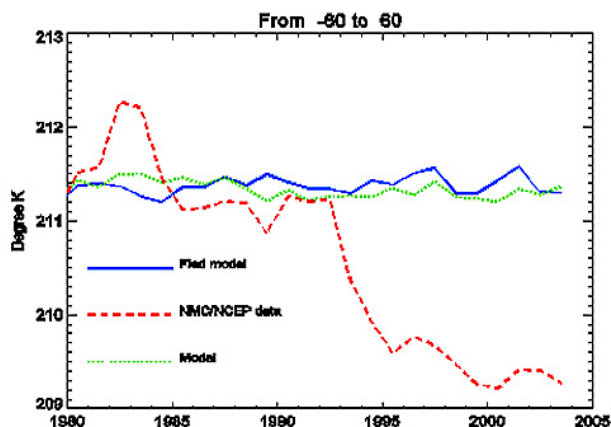


Рис. 16 – Изменчивость температуры стратосферы за счет двуокиси углерода.

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 межгодовую изменчивость содержания озона и температуры стратосферы. Сопоставление результатов численных экспериментов с раздельным и совместным моделированием влияния изменения солнечной активности на фотохимию, радиацию и циркуляцию атмосферы показало, что обратные связи могут приводить как к количественным, так и качественным изменениям содержания озона и температуры.

Полученные результаты показали важность учета обратных связей между изменением содержания атмосферных газов, температуры и циркуляции атмосферы. 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.

Эксперимент с учетом влияния всех факторов показал, что, несмотря на хорошее соответствие результатам измерений, аномального поведения температуры после середины 90-х годов нет. Температура по-прежнему четко идет вслед за озоном. В целом можно сделать вывод, что модель хорошо описывает все процессы и их взаимосвязь между собой, но, тем не менее, либо какие то обратные связи не учтены или недооценены, либо существуют факторы, влияние которых так же недооценено в модели по причине недостаточного их изучения, и проблема нуждается в дальнейшей разработке.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П2595 от 26 ноября 2009 г.) по направлению «Физика атмосферы».

Литература

1. *Houghton J.T.* The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Intergovernmental Panel on Climate Change. — 2001. — P. 881.
2. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion // Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 47. — Geneva, 2003.
3. *Брасье Г., Соломон С.* Аэрономия средней атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 291 с.
4. *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х.* Озонный щит Земли и его изменения. — СПб: Гидрометеиздат, 1992. — 288 с.
5. *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-B98, 1998. — 180 с.
6. *Володин Е.М., Дианский Н.А.* Воспроизведение изменений климата в 19-22 столетиях с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. — 2006. — №3. — С. 291–306.
7. *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.
8. *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. Letters. — 2002. Vol. 29, №22. — P. 2048.
9. *Jackman C.H.* Past, present, and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends // J. Geophys. Res. — 1996. Vol. 101. — P. 28753–28767.
10. *Eyring V.* A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models // Bull. Am. Meteorol. Soc. — 2005. Vol. 86. — P. 1117–1133.
11. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Г. Шаарийбуу, Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46. №3. С. 3–15.
12. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 46. — №4. — С. 5–17.
13. *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.