

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Российский Государственный Гидрометеорологический Университет

На правах рукописи

УДК 551.510.534

ЗИМЕНКО Полина Александровна

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

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
Смышляев Сергей Павлович

**Официальные оппоненты:** доктор географических наук, профессор  
Кондратович Казимир Вячеславович

кандидат физико-математических наук,  
Киселев Андрей Александрович

**Ведущая организация:** Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского

Защита диссертации состоится «25» октября 2007 года в 15 часов 30 минут на заседании Совета Д.212.197.01 по защите диссертаций при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: **195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан « » сентября 2007 года

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета Д.212.197.01  
доктор физико-математических наук, профессор



А.Д.Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Атмосферный озон является одним из наиболее важных атмосферных газов Земли. Несмотря на то, что количество озона в атмосфере мало, он играет важную роль в происходящих в атмосфере физических процессах.

Результаты наблюдений последнего времени обнаружили тревожные тенденции долгопериодной изменчивости газового состава и температурного режима атмосферы, такие как истощение толщины озонового слоя в стратосфере, увеличение его содержания в тропосфере, глобальное потепление в тропосфере и выхолаживание стратосферы. 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 заметное влияние на радиационный нагрев и выхолаживание в атмосфере с соответствующими вариациями ее циркуляции и температурного режима.

Предполагается, что наблюдаемые изменения климата и газового состава атмосферы могут быть, в значительной степени, обусловлены антропогенным воздействием на окружающую среду. 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. 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.

Солнечная активность является природным фактором, который может оказать влияние как на физические, так и на химические процессы в атмосфере. С другой стороны, обратные связи между этими процессами могут существенно изменить масштаб и даже направление влияния солнечной активности на тепловой режим и газовый состав атмосферы.

Механизмы, ответственные за эти особенности, должны изучаться с привлечением численных моделей. В последнее время актуальным стало исследование изменений климата с учетом обратных связей между изменением газового состава, теплового режима и циркуляции атмосферы с использованием химико-климатических моделей (Chemistry-Climate Models (CCM)). Несмотря на то, что модельному исследованию влияния солнечной активности на изменения структуры и состава атмосферы в последнее время уделялось значительное внимание, при этом неявное воздействие солнечной активности на изменения климата еще изучено недостаточно.

## **Цель работы**

Основной целью настоящей работы является исследование с помощью глобальной химико-климатической модели взаимосвязи процессов, формирующих структуру и газовый состав нижней и средней атмосферы на примере влияния солнечной активности, которая одновременно воздействует на фотохимию, радиационные и динамические процессы в атмосфере.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Произвести обзор литературных источников и на его основе рассмотреть современные представления о численном моделировании основных физических и химических процессов, определяющих долгопериодную изменчивость атмосферного озона и температуры;
2. Разработать методику учета обусловленных солнечной активностью изменений спектральных потоков солнечной радиации в модели химии, динамики и радиации атмосферы;
3. Исследовать чувствительность содержания озона к изменению внеатмосферных потоков солнечной радиации в различных участках спектра;
4. Оценить раздельное и одновременное воздействие изменений спектральных потоков солнечной радиации на интенсивность химических реакций и нагрев в атмосфере;
5. Исследовать явное и неявное воздействие солнечной активности на изменения содержания озона и температуры за счет обратных связей между изменением газового состава, теплового режима и циркуляции атмосферы.

## **Научная новизна**

- разработана новая методика учета вариаций внеатмосферных потоков солнечной радиации в 11-летнем цикле солнечной активности в химико-климатической модели с использованием данных спутниковых измерений об изменчивости спектральных потоков солнечной радиации;

- получены новые оценки влияния солнечной активности на фотохимию, радиационные и динамические процессы в атмосфере;

- получены новые данные о степени влияния обратных связей между физическими и химическими процессами на содержание озона и температуру в атмосфере с использованием химико-климатической модели.

**Научная и практическая значимость** работы заключается в том, что разработанная методика учета обусловленных солнечной активностью изменений потоков ультрафиолетовой радиации может использоваться в моделях химии, динамики и радиации для теоретического исследования

долгопериодной изменчивости содержания озона и температуры атмосферы. Применение данной методики позволяет более точно воспроизвести картину глобального состояния стратосферного озонного слоя и его эволюции в ближайшем будущем. Полученные результаты могут быть использованы при анализе современных изменений климата.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- методика учета вариаций спектральных потоков солнечной радиации в 11-летнем цикле солнечной активности, используемая в моделях газового состава и общей циркуляции атмосферы;
- модельные оценки чувствительности общего содержания озона к обусловленной солнечной активностью спектральной изменчивости солнечной радиации;
- количественные оценки влияния изменения солнечных потоков на содержания озона и температуру в атмосфере;
- результаты исследования неявного воздействия солнечной активности на изменения климата за счет обратных связей между изменением газового состава, теплового режима и циркуляции атмосферы.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, Международной школе по исследованию нижней и средней атмосферы (Кардвес, Франция, 2005), второй конференции молодых ученых нац. Гидрометслужб СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии» (Москва, 2006), на Итоговой сессии ученого совета РГГМУ (С-Петербург, 2007), российско-британской конференции молодых ученых «Изменения климата: роль антропогенного воздействия» (С-Петербург, 2007), на 11-ой Всероссийской школе-конференции молодых ученых МАПАТЭ-2007 – "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты", (Н.Новгород, 2007), на Генеральной Ассамблее IUGG XXIV (Перуджа, Италия, 2007).

### **Публикации**

Результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах, материалы использованы в научно-исследовательских отчетах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, рассматривается современное состояние исследуемой проблемы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, определяется теоретическая и практическая значимость работы, ее новизна, а также кратко излагается содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена обзору развития численного моделирования для исследования долгопериодной изменчивости озона и других атмосферных газов, а также температурного режима атмосферы.

Математическое моделирование фотохимических процессов с участием газов и аэрозолей в разных слоях атмосферы быстро и широко развивалось с начала 70-х годов. Лишь в середине 80-х годов появились данные спутниковых измерений глобальных распределений концентрации в стратосфере озона, водяного пара, оксидов азота, метана, которые позволили проверить и уточнить модельные распределения.

Фотохимические и радиационно-фотохимические модели служат основным инструментом исследования, прогноза изменений газового и аэрозольного состава, а также радиационного режима атмосферы в результате фотохимических превращений под действием внешних возмущений разного масштаба и происхождения.

В зависимости от пространственного описания выделяют одномерные, двумерные и трехмерные фотохимические модели (ФХМ). Одномерные модели наиболее полно описывают вертикальную структуру состава, динамические движения в них параметризуются в форме вертикального упорядоченного переноса и коэффициента вертикальной диффузии. Использование одномерных ФХМ позволяет рассмотреть предварительные оценки изменения вертикальной структуры озона вследствие антропогенных выбросов, естественных факторов. Однако с их помощью нельзя получить адекватный прогноз изменения меридиональной картины распределения концентраций малых газовых примесей, который можно получить лишь в рамках многомерных моделей газового состава и динамики.

Для определения высотно-широтного поля концентраций газовых примесей широко используется класс двумерных ФХМ, в которых рассматривается вертикальный и меридиональный перенос газов, а незональные отклонения учитываются параметрически. Двумерные модели позволяют адекватно воспроизводить наблюдаемые особенности высотно-широтного распределения озона и его межгодовую изменчивость, однако являются практически непригодными для исследования обратных связей между физическими и химическими процессами в атмосфере.

Для полного физического понимания всей сложной картины взаимодействия динамических и фотохимических процессов важной задачей

является создание трехмерных моделей переноса и трансформации газовых примесей в атмосфере. В подобных моделях наряду с высотно-широтным рассматривается и долготный перенос атмосферных примесей, что является существенным при рассмотрении процессов в полярных районах, где в последние годы отмечались наибольшие изменения газового состава и климата, а также для корректной оценки влияния планетарных волн на изменчивость атмосферных газов. Кроме того, трехмерные модели позволяют рассмотреть вопрос об учете обратных связей между изменчивостью озона и температуры в атмосфере.

В настоящее время существует широкий спектр численных моделей газового состава атмосферы, которые отличаются друг от друга как схемами фотохимических процессов, так и способами описания динамики переноса газовых компонент и методами расчета неадиабатических притоков тепла и скоростей фотодиссоциации.

В фотохимических превращениях составляющих атмосферы помимо газофазных и гетерофазных фотохимических реакций определенную роль играют взаимодействия излучений Солнца, поверхности Земли и атмосферы с ее газами и аэрозолями и переносы последних движениями атмосферы различных масштабов. Эти химические, радиационные и динамические процессы описываются разными моделями, тесно связанными друг с другом, так что обычно выходные результаты одной модели служат исходными данными для другой. В идеальном случае все эти «блочные» модели следует объединить в одну трехмерную модель общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с включением фотохимических процессов. Такие модели более всеобъемлющие, но при этом требуют для своей реализации мощную вычислительную технику и большой объем исходной информации.

Для теоретического исследования изменчивости циркуляции и температурного режима атмосферы используются численные математические модели общей циркуляции атмосферы. 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.

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 (Chemistry-Climate Models (CCM)), которое позволяет учесть взаимодействия атмосферных физических и химических процессов. В мировом научном сообществе разработано несколько таких моделей. Обычно они разрабатываются на базе известных климатических моделей общей циркуляции атмосферы США, Англии, Германии, Франции и других стран. В данной главе приводится описание современных химико-климатических моделей, используемых для моделирования газового состава атмосферы и климата с учетом обратных связей между изменением газового состава, теплового режима и циркуляции атмосферы.

В России подобный класс моделей химии и динамики представлен совместной глобальной трехмерной химико-климатической моделью, разработанной в Институте вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН) и Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете (РГГМУ). В данной работе, с помощью химико-климатической модели ИВМ РАН и РГГМУ исследуется взаимосвязь процессов, формирующих структуру и газовый состав нижней и средней атмосферы на примере влияния солнечной активности, которая одновременно воздействует на фотохимию, радиационные и динамические процессы в атмосфере. Подробное описание используемой модели приведено во второй главе.

В **Главе 2** приводится описание глобальной трехмерной модели химии и климата, состоящей из разработанной в РГГМУ трехмерной фотохимической модели, интерактивно соединенной с моделью общей циркуляции нижней и средней атмосферы института вычислительной математики РАН.

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  $5^\circ$  по долготе,  $4^\circ$  по широте и 39  $\sigma$ -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.

С химико-климатической моделью были проведены численные эксперименты по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в 1979-1999 гг. Нижние граничные условия в модели задаются на основании данных ВМО (потoki газовых примесей с земной поверхности). 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.

Основываясь на необходимости учета влияния солнечной активности в моделях химии и климата при изучении атмосферного озона, автором была разработана и реализована параметризация внеатмосферных спектральных потоков солнечной радиации. Основой данной методики является использование данных спутниковых измерений о вариациях интенсивности солнечной радиации в диапазоне длин волн 175-450 нм при изменении солнечной активности.

На рис. 1 представлена спектральная изменчивость отношения интенсивностей солнечной радиации при максимальном и минимальном уровне солнечной активности как функция длины волны, полученная на основе спутниковых наблюдений за последние три солнечных цикла.

Наибольшие значения изменчивости наблюдаются в диапазоне 200-300 нм, затем отмечаются незначительные колебания при длинах волн больших 300 нм, далее значения близки к нулю.

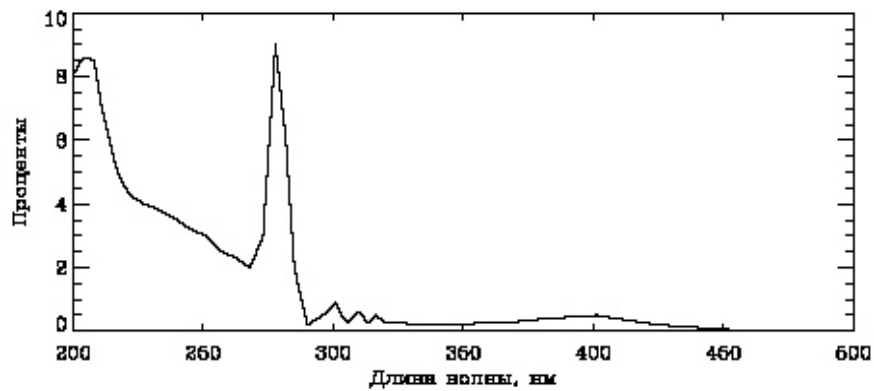


Рис. 1. Спектральная зависимость процентного изменения интенсивности солнечной радиации при увеличении солнечной активности от минимума к максимуму по результатам измерений.

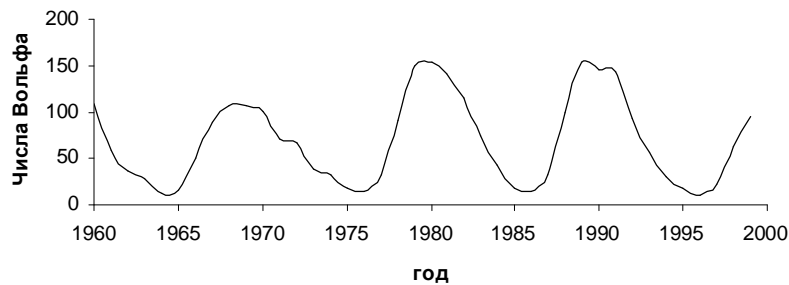


Рис. 2. Межгодовая изменчивость чисел Вольфа для периода 1960 – 2000 гг. по данным наблюдений

Представленные на рисунке 1 данные позволяют оценить амплитуды изменения интенсивности солнечной радиации при изменении солнечной активности от минимума к максимуму в течение 11-летнего цикла.

Для того чтобы параметризовать межгодовую изменчивость интенсивности солнечной радиации были использованы данные Всемирного центра наблюдений за количеством солнечных пятен. Уровень солнечной активности менялся пропорционально этим данным.

Для учета межгодовой изменчивости потоков солнечной радиации вводился коэффициент  $k$ , учитывающий уровень солнечной активности, в зависимости от чисел пятен Вольфа  $W$ :

$$k = -1 + 1/76 * (W - 8), \quad (2.1)$$

Затем базовые внеатмосферные спектральные потоки солнечной радиации изменялись в зависимости от длины волны и фазы солнечного цикла, основываясь на данных спутниковых измерений о вариациях интенсивности солнечной радиации при изменении солнечной активности

$$F(\lambda, W) = \tilde{F}(\lambda) * (1 + 0.005 * A(\lambda) * k), \quad (2.2)$$

где  $F(\lambda, W)$  – спектральный поток солнечной радиации, рассчитанный с учетом влияния солнечного цикла,  $\tilde{F}(\lambda)$  – базовый спектральный поток солнечной радиации (без учета солнечного цикла),  $A(\lambda)$  – амплитуда изменения солнечной радиации от минимума к максимуму солнечной активности,  $\lambda$  – длина волны.

Использование вышеуказанной методики позволяет рассмотреть долгопериодный отклик озоносферы на изменение солнечной активности.

**Глава 3** посвящена изучению реакции содержания озона на обусловленные солнечной активностью изменения внеатмосферных потоков солнечной радиации путем проведения численных экспериментов с двумерной фотохимической модели РГМУ с фиксированными динамическими параметрами из трехмерной модели общей циркуляции атмосферы Института вычислительной математики РАН. Влияние солнечной активности на фотохимию атмосферных газов учитывалось в радиационном блоке модели с помощью разработанной параметризации спектральной изменчивости внеатмосферных потоков солнечной радиации.

На рис. 2 представлено сравнение межгодовой изменчивости среднеглобального озона по отношению к среднему за 70-е годы по данным модельных экспериментов, полученных с учетом и без учета солнечного цикла, с результатами измерений TOMS.

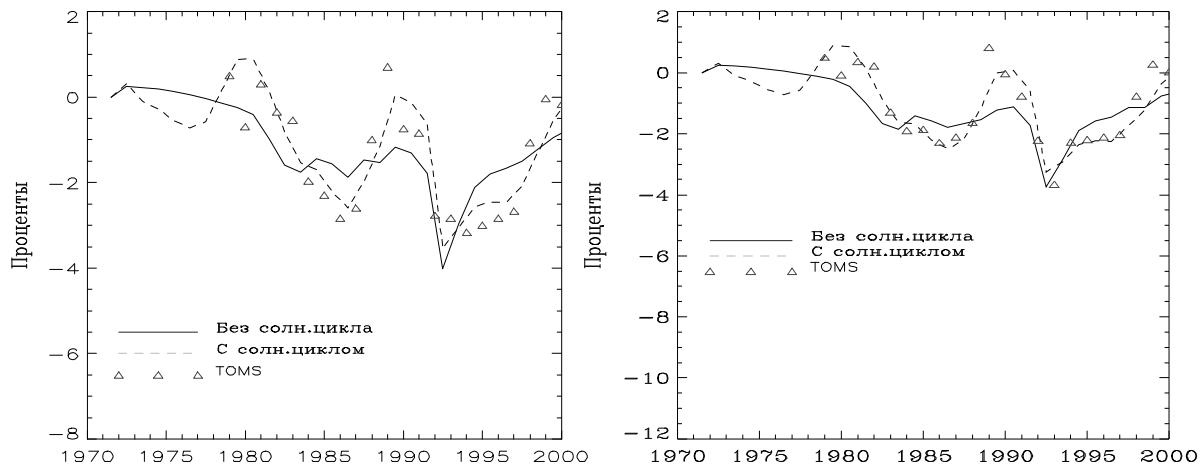


Рис. 2. Межгодовая изменчивость среднеглобального озона в процентах по отношению к среднему за 70-е годы в неполярных районах (левая панель) и в тропическом регионе (правая панель).

Введение новой методики учета солнечного цикла существенно улучшило воспроизведение наблюдаемой изменчивости атмосферного озона. Наилучшее согласие результатов расчетов с результатами измерений отмечается в низких широтах (рис. 2, правая панель), где фотохимические процессы преобладают над динамическими в формировании содержания озона.

На следующем этапе модельных экспериментов проводилось исследование чувствительности содержания озона к изменению внеатмосферных потоков солнечной радиации в различных участках спектра.

Для этого спектральный диапазон 175-450 нм был разбит на равные участки шириной 25 нм. Каждому из подобных участков соответствовал свой модельный эксперимент, в котором квазистационарное распределение годового хода содержания озона рассчитывалось при увеличенной на 20 % интенсивности солнечной радиации в данном участке спектра. Таким образом, было получено 12 квазистационарных состояний годового хода озона.

Максимальный положительный эффект достигался при увеличении уровня солнечной радиации в диапазоне длин волн 200-225 нм, а отрицательный - в спектральном диапазоне 300-325 нм (рис. 2).

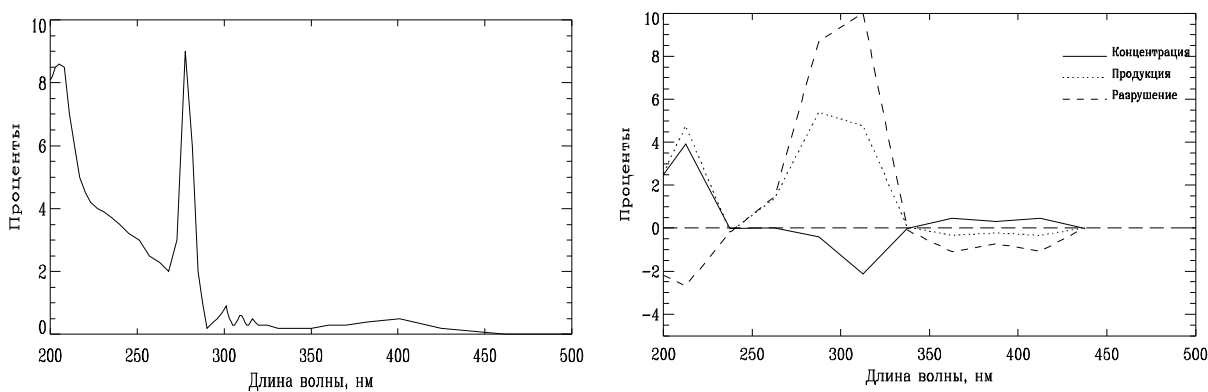


Рис. 2. Спектральная изменчивость потоков солнечной радиации при изменении солнечной активности от минимума к максимуму (левая панель); расчетная изменчивость средне-глобального содержания озона при 20-процентом увеличении потоков солнечной радиации в различных спектральных диапазонах (правая панель).

Таким образом, результаты модельных экспериментов по исследованию чувствительности атмосферного озона к изменчивости внеатмосферных потоков солнечной радиации в различных участках солнечного спектра показали, что при существующей спектральной зависимости амплитуд изменения потоков солнечной радиации глобальное содержание озона в атмосфере имеет тенденцию к увеличению за счет увеличения продукции и уменьшения разрушения в ответ на изменение солнечных потоков в диапазоне 200-225 нм. Однако имеется потенциал к сокращению содержания озона при увеличении интенсивности солнечной радиации в диапазоне 300-325 нм, который пока, вероятно, не реализовывался из-за малых амплитуд изменения радиации в этом участке спектра. Однако при определенных условиях на поверхности солнца могут происходить вспышки, приводящие к изменению среднего распределения

амплитуд реакции ультрафиолетового излучения на солнечную активность. В подобных случаях могут возникнуть условия, приводящие к локальному сокращению содержания озона в атмосфере Земли.

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 стороны, ускоряются процессы каталитического разрушения озона в азотных и водородных циклах. На третьем этапе численных экспериментов квазистационарное распределение концентрации озона рассчитывалось для внеатмосферных потоков солнечной радиации, соответствующих минимуму и максимуму солнечной активности. Анализ двух, полученных таким образом, квазистационарных годовых циклов озона, а также скоростей образования и разрушения озона, позволил отметить положительную реакцию содержания озона, т.е. преобладание ускорения продукции озона над увеличением его разрушения, хотя в нижней части озоносферы скорости образования и разрушения озона одновременно уменьшились. Однако, благодаря доминирующей роли атмосферного переноса, изменение концентрации озона в этом высотном диапазоне остается положительным при увеличении солнечной активности и плавно меняется по высоте и широте, несмотря на достаточно резкие изменения скоростей образования и разрушения озона. Исследование высотных особенностей отклика атмосферного озона показало, что при одновременном увеличении скоростей фотохимической продукции и разрушения озона при увеличении индекса солнечной активности основную роль играет различная реакция скоростей разрушения озона в различных каталитических циклах.

В **Главе 4** с помощью трехмерной интерактивной химико-климатической модели РГГМУ–ИВМ предпринята попытка исследовать взаимосвязь процессов, формирующих структуру и газовый состав нижней и средней атмосферы на примере влияния солнечной активности, которая одновременно воздействует на фотохимию, радиационные и динамические процессы в атмосфере.

На первом этапе экспериментов исследовалось изменение содержания озона и температуры атмосферы как результат влияния солнечной активности только на изменение скоростей фотодиссоциации газов, как с учетом, так и без учета обратных связей между изменением озона, радиационным нагревом и динамикой (рис. 3).

В стратосфере и, особенно, в ее нижней части, где существенно влияние атмосферного переноса на содержание озона, “включение” в модель механизма учета обратных связей значительно меняет картину высотно-широтного распределения изменения концентрации озона. Основным качественным изменением ниже 40 км является нарушение широтной

однородности отклика содержания озона на увеличение внеатмосферных потоков солнечной радиации в УФ диапазоне (сравн. левую и правую панели рис. 3).

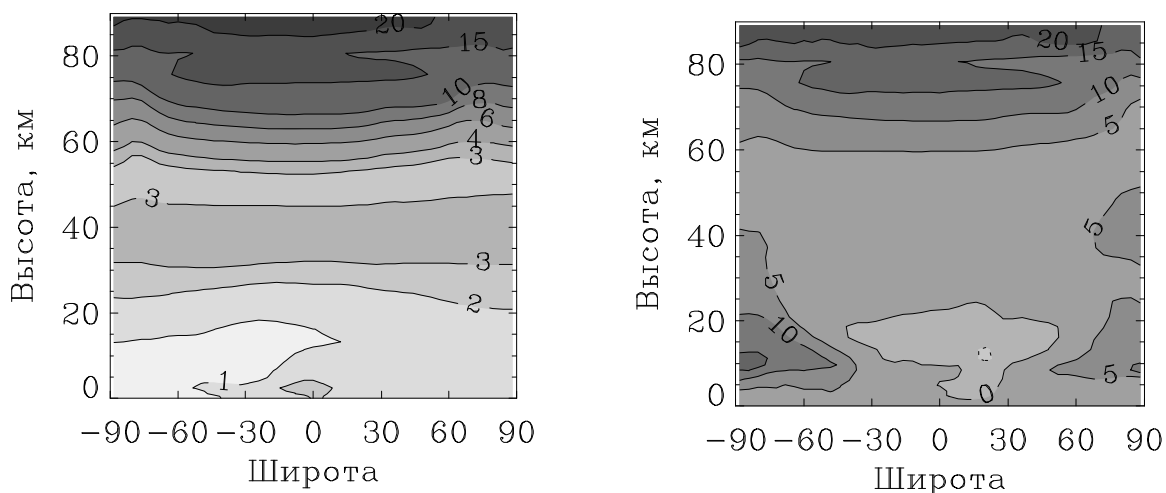


Рис. 3. Высотно-широтная изменчивость концентрации озона (%) как результат влияния солнечной активности на фотохимию без учета (левая панель) и с учетом (правая) обратного влияния изменения содержания озона на нагрев.

Увеличение концентрации озона при изменении 11-летнего солнечного цикла от минимума к максимуму воздействует на интенсивность меридиональной циркуляции Брюера-Добсона от тропических в сторону полярных широт. Приток озона в средние широты возрастает при высоком уровне СА по сравнению с притоком в период минимума СА.

Кроме того, изменение содержания озона в цикле солнечной активности приводит к изменению температурного режима атмосферы. Увеличение температуры в тропической зоне верхней стратосферы от минимума к максимуму солнечной активности составляет примерно 1,5 градуса Кельвина.

Следует заметить, в эксперименте без учета обратного влияния изменения содержания озона на радиационный режим атмосферы изменений температуры не происходит.

В целом, при явном и неявном воздействии солнечной активности только на фотохимию атмосферных газов от минимума к максимуму солнечной активности отмечается увеличение содержания озона и повышение температуры стратосферы, которое сохраняется в течение всех сезонов, на всех широтах и высотах.

В последней 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 фотохимию атмосферных

газов, так и на изменение нагрева атмосферы с учетом обратных связей (рис. 4).

В средней и нижней стратосфере полный учет обратных связей между химией, радиацией и динамикой привел 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.4) в нижней стратосфере полярных районов, что согласуется с данными наблюдений.

Наибольшие изменения отмечаются в нижней части озоносферы, где содержание озона определяется динамическими факторами. Также можно отметить несимметричность процессов в северном и южном полушариях в высоких широтах и сезонную изменчивость.

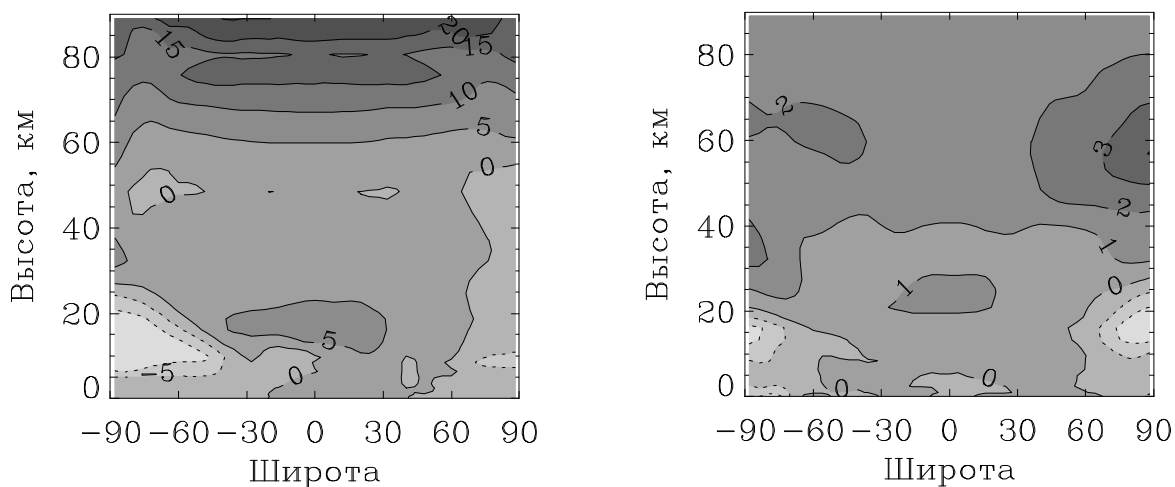


Рис. 4. Высотно-широтная изменчивость концентрации озона (%) (левая панель) и температуры (К) (правая панель) как результат влияния солнечной активности на фотохимию и динамику с обратной связью

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 (сравн. рис.3). 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.

В условиях более холодной стратосферы для случая с максимальной солнечной активностью (правая панель рис. 4) 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 активности от минимума к максимуму 11-летнего цикла, рассмотренное в первой серии модельных экспериментов, когда эффект в полярных районах был положительным весь год.

Выполненное моделирование показало важную роль обратных связей между физическими и химическими процессами, которые могут приводить как к количественным, так и качественным изменениям содержания озона и температуры.

### **Заключение**

При выполнении настоящей диссертационной работы получены следующие **основные результаты**:

- Разработана методика учета изменений спектральных потоков солнечной радиации в 11-летнем цикле солнечной активности при моделировании изменчивости озона и температуры в атмосфере;
- Учет солнечного цикла в модели озоносферы позволил существенно улучшить воспроизведение наблюдаемой межгодовой изменчивости атмосферного озона;
- При увеличении солнечной радиации максимальный положительный эффект отклика озона наблюдается в диапазоне длин волн 200-225 нм;
- В средней и нижней стратосфере полный учет обратных связей между химией, радиацией и динамикой привел к смене знака эффекта с положительного на отрицательный в полярных регионах, что согласуется с данными наблюдений;
- Приток озона в средние широты возрастает при высоком уровне солнечной активности по сравнению с притоком в период минимума солнечной активности;
- При этом неявное воздействие солнечной активности на изменения климата за счет обратных связей усиливает пространственную неоднородность этих изменений.



### Основные публикации по теме диссертации.

1. Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П. Модельное исследование чувствительности содержания атмосферного озона к вызванным солнечной активностью изменениям спектральных потоков солнечной радиации. – Метеорология и гидрология, № 8, 25-37, 2005.
2. Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П., Малых А.А. Прогностические оценки изменения содержания атмосферного озона в первой половине XXI века. – Изв.РАН, сер.ФАО, 42, №2, 191-204, 2006.
3. Зименко П.А. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы – Тезисы докладов второй конференции молодых ученых нац. Гидрометслужб СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии», с. 61, Москва, 2006.
4. Зименко П.А. – Тезисы докладов на 11 Всероссийской школе - конференции молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты", МАПАТЭ-2007, с. 57, Н.Новгород, 2007
5. Зименко П.А., Смышляев С.П., Галин В.Я., Атласкин Е.М., Кудрявцев А.П. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы. – Изв.РАН, сер.ФАО, в печати, 2007.



Зименко П.А.