

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи  
УДК 551.510.534

Моцаков Максим Анатольевич

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЗОНАЛЬНЫХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА 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

2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Смышляев Сергей Павлович.

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Егоров Александр Дмитриевич  
Кандидат физико-математических наук  
Кузьмина Светлана Игоревна

**Ведущая организация:**

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

Защита диссертации состоится « 9 » декабря 2010 года в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного Совета Д.212.197.01 в 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 «    » ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.197.01  
Доктор географических наук, профессор



А.И. Угрюмов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Состав и структуру атмосферы Земли определяет ряд астрономических, геофизических, метеорологических и антропогенных факторов. Механизм воздействия этих факторов имеет крайне неоднородную пространственно-временную структуру. Наибольшие неоднородности в атмосфере Земли прослеживаются при рассмотрении вертикальных профилей метеорологических параметров, что в значительной степени, определено логарифмическим характером кривой изменения плотности воздуха с высотой. А также малой толщиной слоя атмосферы по отношению к ее горизонтальной протяженности, следствием чего является факт наличия вертикальных градиентов метеорологических параметров несравнимых по величине с горизонтальными.

Широтные (вдоль меридиана) неоднородности атмосферы намного менее выражены в сравнении с вертикальными но, тем не менее, они также играют одну из определяющих ролей в формировании состава и структуры атмосферы. Так как, именно через них проявляет себя такой важнейший фактор как неравномерное распределение энергии солнца с широтой.

Природа возникновения незональных возмущений в атмосфере носит в основном волновой характер, где отклонение от среднезонального значения возникает как следствие проявления глобальной волны в поле рассматриваемого параметра. Но кроме волновой природы имеют место также такие механизмы как, основные моды циркуляции, влияние неоднородной подстилающей поверхности, антропогенные воздействия, местные особенности климата. Долготные (вдоль круга широты) неоднородности атмосферы наименее выражены в атмосфере, следствием чего, зачастую, является пренебрежение ими в вопросах решения ряда задач, ставящих целью описание процессов формирования состава и структуры атмосферы. Что

обусловлено в основном экономическими, методологическими, и иными причинами не позволяющими использовать трехмерные пространственно-временные модели некоторых параметров атмосферы.

Атмосферный озон играет одну из главных ролей в процессах энергообмена между различными частями атмосферы. При поглощении озоном УФ радиации Солнца в стратосфере происходит выделение тепла, неравномерное распределение которого является одним из главных источников циркуляции атмосферы. Кроме этого, озон, являясь парниковым газом, поглощает часть длинноволновой радиации, отраженной от поверхности Земли. Ввиду высокой химической активности озона, его роль в фотохимических процессах атмосферы чрезвычайно велика.

При рассмотрении всего вышесказанного, возникает естественный вопрос - какова роль незональных возмущений озона в формировании глобальной структуры и состава атмосферы? Велика ли их роль в формировании характера внутригодовой и межгодовой изменчивости газового состава и структуры атмосферы? Ответы на эти вопросы лежат в одной плоскости с такими важными на сегодняшний день проблемами, как глобальное изменение климата и роль антропогенного фактора в этом процессе.

Возможность модельного описания незональных возмущений озона может быть крайне важна для ряда задач климатологии и атмосферной химии, в связи, с чем важно исследовать их роль в процессах формирования структуры и состава атмосферы. Для упрощенного представления незональных возмущений озона и описания их в моделях ориентированных на изучение динамики атмосферы необходимо разрабатывать и применять алгоритмы параметризации. До недавнего времени было невозможно провести детальные оценки роли долготных неоднородностей в атмосфере. Но с появлением крупномасштабных трехмерных интерактивных моделей газового состава и динамики атмосферы появилась возможность исследования влияния незональных вариаций озона на атмосферные процессы.

## Цель работы

Основной целью настоящей работы является исследование влияния долготных вариаций концентрации озона на изменения состава и структуры нижней и средней атмосферы в глобальном масштабе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику модельного исследования влияния долготных вариаций концентрации озона на изменения состава и структуры средней атмосферы;
2. Выяснить относительную роль долготных вариаций концентрации озона в изменениях состава и структуры нижней и средней атмосферы;
3. Определить физические и химические процессы, влияющие на формирование долготных вариаций состава и структуры атмосферы;
4. Разработать и реализовать алгоритм учета влияния долготных вариаций концентрации озона на глобальные изменения состава и структуры атмосферы;
5. Исследовать влияние обратных связей между долготными вариациями содержания озона и изменением газового состава, теплового режима и циркуляции атмосферы.

## Научная новизна

Получены новые оценки влияния незональных возмущений глобального поля озона на процессы формирования состава и структуры атмосферы.

Разработан новый параметризационный алгоритм для описания фотохимии озона, позволяющий корректно описывать процессы генерации мезомасштабных возмущений содержания озона, что чрезвычайно важно для моделирования воздействия озона на циркуляцию верхней и средней атмосферы.

На основе параметризационного алгоритма разработана глобальная трехмерная модель долготных вариаций озона. Проведены эксперименты с моделью.

#### Научная и практическая значимость

Полученные оценки роли незональных возмущений глобального поля концентрации озона, а также разработанная методика описания незональных возмущений озона могут использоваться при построении глобальных климатических моделей для теоретических исследований изменчивости газового состава и термодинамической структуры атмосферы. Применение данной методики позволяет более точно воспроизвести картину глобального состояния стратосферного озонового слоя и его эволюции.

#### Основные положения, выносимые на защиту

- методика исследования влияния вариаций характеристик атмосферы на изменения состава и структуры нижней и средней атмосферы в глобальном масштабе
- модельные оценки роли незональных возмущений глобального поля концентрации озона в процессах формирования термодинамического режима атмосферы.
- модельные оценки роли незональных возмущений глобального поля концентрации озона в процессах формирования газового состава атмосферы.
- алгоритм параметризации незональных возмущений глобального поля озона.
- глобальная модель долготных вариаций концентрации озона.

## Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно. В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежит участие в постановке задач, их решении, математической обработке и анализе исходных данных и результатов моделирования. Автором самостоятельно, в ходе экспериментов с совместной моделью МГС РГГМУ - ИВМ РАН, получены новые оценки влияния незональных возмущений глобального поля озона на процессы формирования состава и структуры атмосферы. Разработан и реализован параметризационный алгоритм для описания фотохимии озона. На основе параметризационного алгоритма самостоятельно разработана и реализована глобальная трехмерная модель долготных вариаций озона на основе “off-line” динамического ядра. Проведены эксперименты с моделью.

## Апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, на Итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (С-Петербург, 2009 г.), на Итоговой сессии ученого совета РГГМУ (С-Петербург, 2010 г.), на Генеральной ассамблеи европейского геофизического общества EGU (Вена, Австрия, 2010 г.)

## Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 3 печатных работах, материалы использованы в научно-исследовательских отчетах.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы объемом 103 наименования. Рукопись содержит 95 страниц, 15 рисунков, 7 таблиц.

## 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.

В **Главе 1** приводятся основные сведения о фотохимических и динамических процессах, оказывающих влияние на пространственное распределение и временную эволюцию поля озона. Раскрывается природа возникновения и научная значимость пространственных вариаций поля озона.

Газовые составляющие атмосферы, содержание которых в воздухе мало, принято называть малыми газовыми составляющими (МГС) или малыми газовыми примесями. Содержание МГС в атмосфере подчиняется системе уравнений переноса примесей, которые, по сути, есть уравнения неразрывности (уравнения сохранения массы), записанные с учетом источников и стоков примесей (1).

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (Vc_i) = P_i - L_i c_i, \quad i = 1 \dots N \quad (1)$$



Где  $c_i$  - отношение смеси  $i$ -й примеси,  $t$  - время,  $V$  - вектор скорости,  $\nabla$  - дифференциальный оператор «набла»,  $P_i$  - скорость фотохимического образования,  $L_i$  - скорость фотохимического разрушения  $i$ -й примеси,  $N$  - число взаимодействующих примесей. Скорости фотохимического образования и разрушения примеси пропорциональны концентрациям взаимодействующих примесей, а коэффициентами пропорциональности служат коэффициенты скоростей реакций. Коэффициенты скоростей химических реакций могут зависеть от температуры и давления, коэффициенты скоростей реакций фотодиссоциации определяются сечением поглощения фотодиссоциирующей примеси и спектральной интенсивностью излучения в точке, где рассматривается реакция. Озон непосредственно участвует в нескольких десятках реакций. Число же фотохимических реакций, представляющих интерес для моделирования фотохимического баланса атмосферного озона, доходит до сотни и включает десятки МГС атмосферы. Ввиду высокой химической активности озона его роль в фотохимических процессах атмосферы чрезвычайно велика.

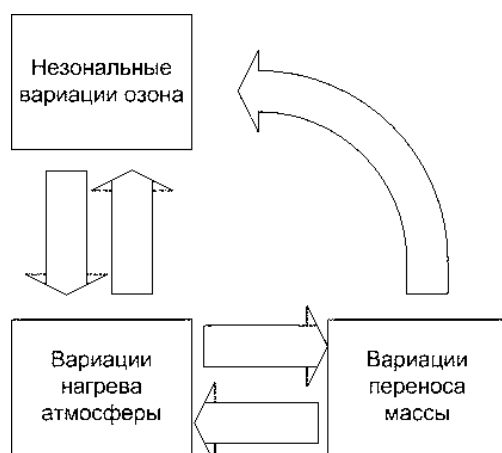


Рисунок 1 – Взаимодействие между химическими, радиационными и динамическими процессами в средней атмосфере

Перенос - ключевой фактор, влияющий на изменчивость многих примесей, в том числе, озона. Влияние атмосферного переноса на содержание примесей может быть непосредственным и опосредованным - через изменение температурного режима атмосферы, влияющего на скорости фотохимических процессов. Поскольку некоторые из атмосферных примесей являются радиационно-активными, то изменение их содержания может отражаться на термическом режиме атмосферы и, следовательно, влиять на динамические процессы, приводя, таким образом, к обратным связям между изменением химического состава и динамикой атмосферы (рисунок 1).

Ввиду сильной широтно-высотной зависимости фотохимически - равновесного содержания и характерного времени фотохимической релаксации озона, крупномасштабный перенос в меридиональной плоскости оказывает огромное влияние на пространственное распределение и временную изменчивость озона в стратосфере. Крупномасштабный стратосферный перенос примесей может быть представлен как совместный результат адвекции за счет меридиональной циркуляции и эффектов вихревого переноса.

Крупномасштабные долготные неоднородности атмосферных параметров обычно аппроксимируют суммой зональных гармоник, причем на высотах средней атмосферы (15 - 110 км) существенный вклад в долготные вариации вносят только гармоники с малыми зональными волновыми числами, так называемые планетарные волны. Атмосферные волны глобального масштаба могут быть классифицированы по различным признакам: источники возбуждения (вынужденные и свободные колебания атмосферы); возвращающие силы, отвечающие за возникновение колебаний (инерционные и гравитационные волны); горизонтальные (зональные) фазовые скорости (стационарные и бегущие на восток или запад волны); условия распространения (вертикально распространяющиеся внутренние и затухающие внешние волны); широтная структура (симметричные и антисимметричные относительно экватора моды, экваториально захваченные и внетропические волны) и т. д. Актуальность изучения динамических процессов, в том числе

волновых возмущений, обусловлена также тем, что пространственные неоднородности различных масштабов, наблюдаемые в нейтральной атмосфере Земли, играют важную роль в функционировании современных технологических систем. Например, атмосферные волны оказывают существенное влияние на траектории спутников, чувствительных к вариациям плотности атмосферы и нейтрального ветра, а также космических аппаратов типа Space Shuttle при их возвращении на Землю. Точность определения местоположения объектов с помощью спутниковых навигационных систем зависит от знания состояния ионосферы, которое в значительной степени определяется системой нейтральных ветров на ионосферных высотах.

Кроме совокупности факторов химической природы, на процессы накопления и разрушения неэонального озона, оказывают влияние динамические факторы. В свою очередь поле озона через процессы молекулярного и лучистого теплообмена воздействует на процессы переноса в атмосфере. Изучение взаимодействия динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы Земли с озоносферой, является одной из важнейших фундаментальных задач физики околоземного космического пространства. Уменьшения содержания стратосферного озона ведет к охлаждению стратосферы и в результате может приводить к сопутствующим изменениям скорости зонального стратосферного ветра и динамики планетарных волн. Уменьшение содержания стратосферного озона в Антарктиде воздействует на Южную кольцевидную моду. Ключевым является вопрос о возможных обратных связях между изменениями стратосферного климата (температуры, ветра) и активностью планетарных волн (как за счет влияния на источники волн в тропосфере, так и за счет изменения условий распространения волн в стратосфере и внутри нее). Однако в настоящее время этот вопрос слабо исследован и далек от понимания.

**Глава 2** Для исследования роли долготных вариаций концентрации озона в формировании состава и структуры атмосферы в работе используется метод теоретического моделирования.

Механизмы влияния неzonальных возмущений поля концентрации озона на состав и структуру атмосферы, а также непрямыe обратные связи, присутствующие в процессе рассматриваемого взаимодействия сложно, а зачастую невозможно оценить теоретически в силу их неочевидности. Следствием чего является применение методов математического моделирования, которые, на сегодняшний день, позволяют наиболее корректно описать и дать количественные оценки роли долготных вариаций концентрации озона в формировании временной и пространственной изменчивости состава и структуры атмосферы. Для решения данной задачи целесообразно использовать совместные химико-климатические модели ХКМ. Данные математические инструменты представляют собой объединенные, интерактивно взаимодействующие между собой модели общей циркуляции атмосферы МОЦА и модели газового состава атмосферы МГС. Совместные ХКМ позволяют наиболее полно описать процессы формирования прямых и обратных связей между динамическими и химическими процессами, определяющими состояние атмосферы и его внутригодовую и межгодовую изменчивость

Географическое и временное распределение малых газовых составляющих зависит не только от химических реакций, которые вносят вклад в их образование и разрушение, но также и от температуры, которая определяет скорости многих химических процессов. А также от атмосферной динамики, которая обуславливает перенос химических компонент. Соответственно температура стратосферы и мезосферы определяется количеством оптически активных компонент, распределение которых может зависеть от химических и фотохимических процессов. Наконец, атмосферная циркуляция управляется неоднородностью нагрева атмосферы; т.к. направление и сила средних ветров определяются температурными градиентами.

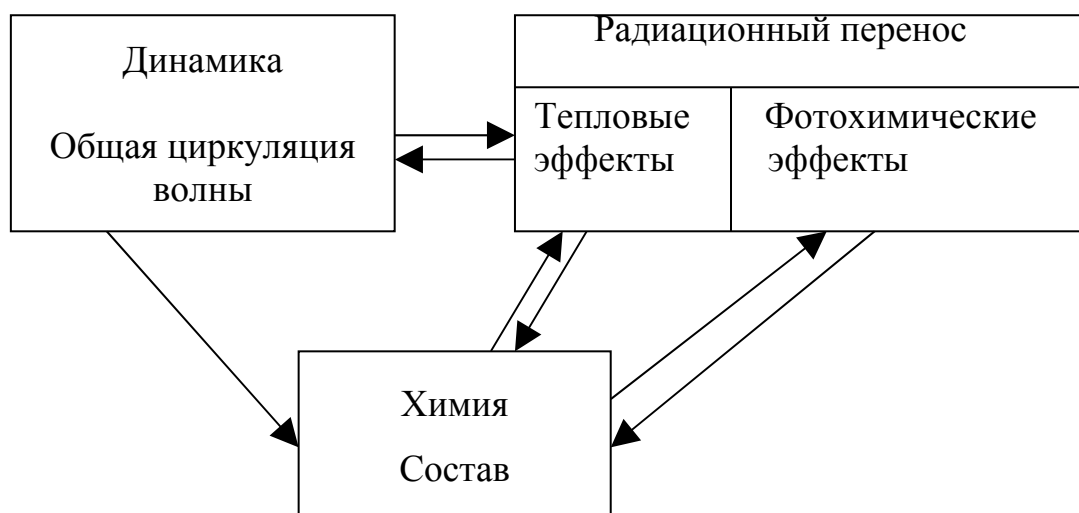


Рисунок 2 – Взаимодействие между химическими, радиационными и динамическими процессами в средней атмосфере.

На рисунке 2 схематически показаны возможные взаимодействия между химическими, радиационными и динамическими процессами. Изучение атмосферной реакции на любое внешнее возмущение (вариации солнечного потока, вариации метеорологических параметров, извержения вулканов или антропогенные воздействия и т. д.) должно учитывать эти механизмы взаимодействия. Связь между температурой и озоном, например, представляет собой важный пример такого взаимодействия. Хорошо известно, что первичным источником тепла в стратосфере и мезосфере является поглощение ультрафиолетовой радиации озоном. Изменение концентраций этого газа в результате каких-то возмущений приводит к соответствующему изменению температуры.

Во второй главе 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 между моделью общей циркуляции атмосферы

МОЦА и газового состава МГС, что позволяет учитывать взаимодействия фотохимических и динамических процессов в атмосфере на каждом модельном шаге по времени. 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.

**Глава 3** посвящена изучению влияния незональных вариаций концентрации озона на структуру и газовый состав атмосферы. Для оценки влияния незональных вариаций концентрации озона на структуру и газовый состав атмосферы автором была разработана методика модельного исследования, которая была отработана в ходе ряда экспериментов.

Эксперимент первый – «Исследование влияния незональных вариаций озона на термодинамический режим атмосферы». Эксперимент поставлен следующим образом – сначала был произведен «опорный» запуск глобальной модели газового состава атмосферы для формирования глобальной трехмерной модели распределения озона. Далее, произведен запуск динамической модели, на тот же период что и предыдущий, с использованием данных о распределении концентрации озона по результатам «опорного» запуска. Третьим шагом эксперимента был запуск динамической модели атмосферы с использованием данных о распределении концентрации озона по результатам «опорного»

запуска, но с зонально-фильтрованным полем концентрации озона. По результатам модельных расчетов вычислены разности полей среднезонального среднемесячного ветра и температуры, полученных при запусках модели с зонально-возмущенным полем озона и зонально-фильтрованным полем. На рисунке 3 приведено распределение вышеописанных разностей по температуре для 6 и 12 месяца. По вертикальной оси отображена высота в километрах, а по горизонтальной оси - широта в градусах. Отрицательные значения широты соответствуют южному полушарию.

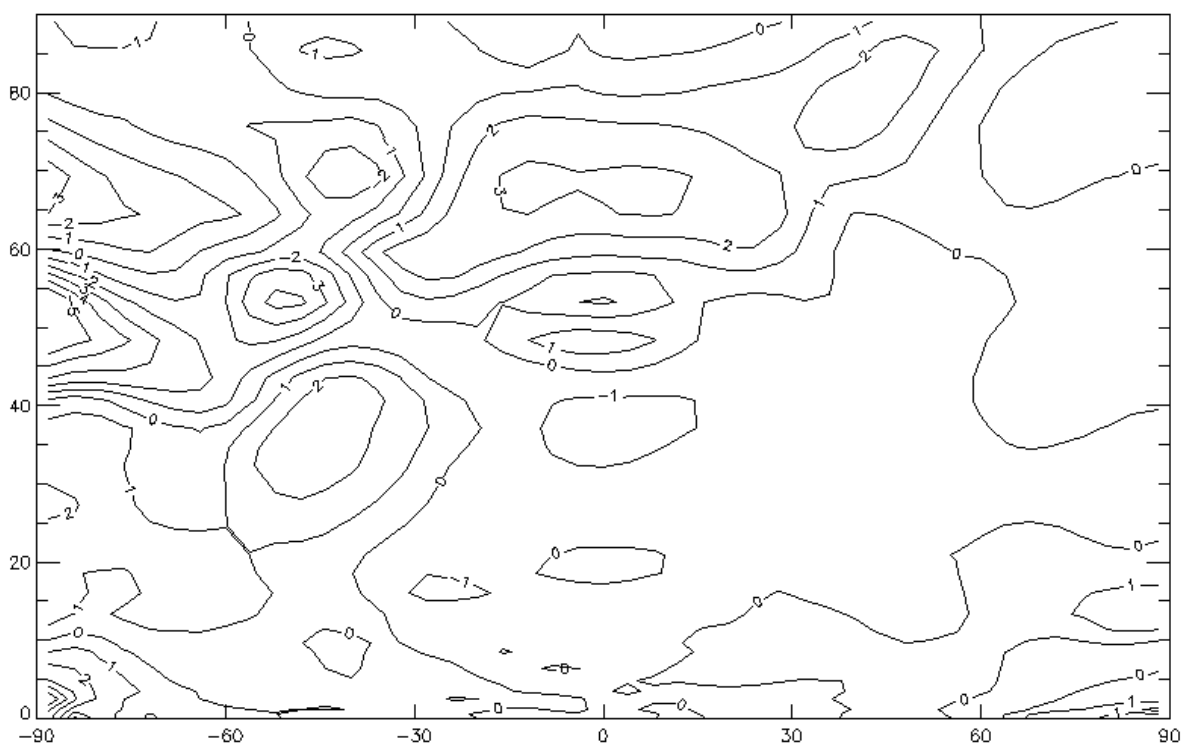


Рисунок 3 - Вклад долготных вариаций в поле температуры. Июнь.

Эксперимент второй – «Исследование влияния незональных вариаций озона на внутригодовую изменчивость газового состава атмосферы». В рамках данного эксперимента удалось оценить вклад долготных вариаций в процессы формирования газового состава и их внутригодовую изменчивость. Эксперимент поставлен следующим образом – сначала был произведен «опорный» запуск совместной химико-климатической модели атмосферы для формирования глобальной модели распределения озона и других малых

газовых составляющих на период равный году. Далее был разработан и внедрен в совместную ХКМ механизм пошаговой фильтрации долготных вариаций концентрации озона. После чего произведен запуск ХКМ, на тот же период что и предыдущий, но с использованием механизма фильтрации.

По результатам двух вариантов модельных расчетов вычислены разности полей малых газовых составляющих атмосферы, полученных при запусках модели с зонально-возмущенным полем озона и зонально-фильтрованным полем. На рисунке 4 отражен вклад незональных вариаций озона в формирование внутригодовой изменчивости малых газовых составляющих атмосферы, таких как  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_3$ .

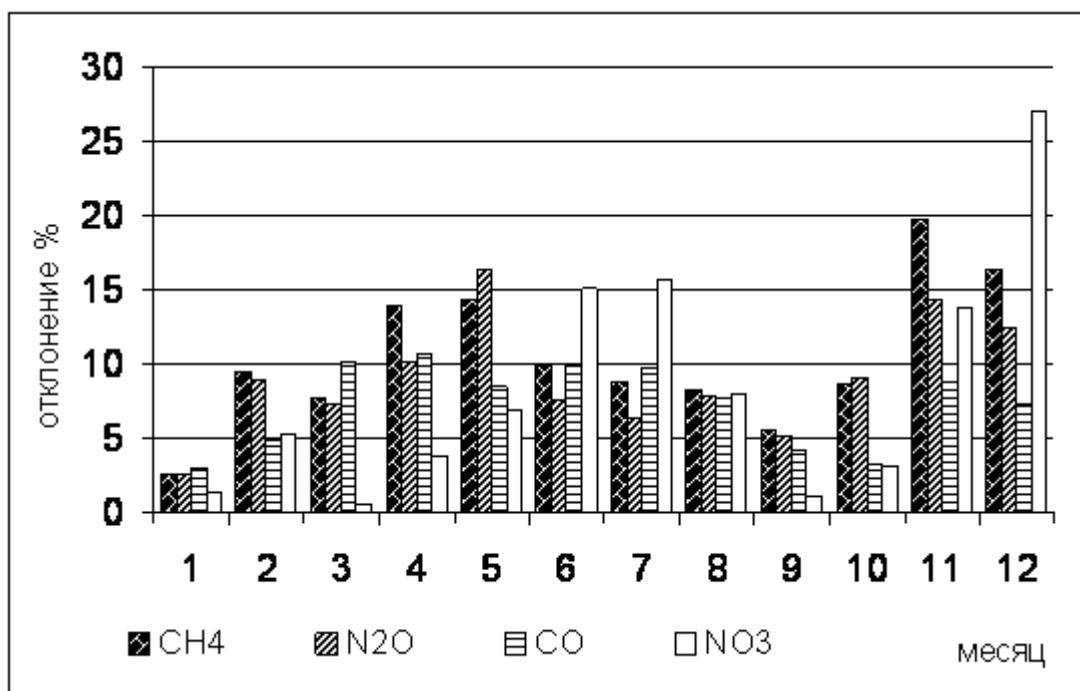


Рисунок 4 Влияние незональных вариаций озона на внутригодовую изменчивость компонент газового состава.

Анализируя и обобщая полученные в ходе экспериментов результаты можно сразу отметить следующие особенности в характере влияния незонально возмущенного озона на компоненты газового состава, ветер и температуру:



- 1) Минимальный отклик всех перечисленных параметров совпадает во времени и наблюдается в январе и сентябре.
- 2) Для всех параметров характерна структура внутригодовой изменчивости отклика с хорошо выраженными двумя максимумами и минимумами. Что, предположительно, есть отражение характера годовой изменчивости количества, а как следствие и активности атмосферного озона.
- 3) Незональный озон проявляет себя наиболее всего в период с марта по июль, а также в ноябре-декабре.
- 4) Незональный озон вызывает понижение температуры стратосферы в полярных широтах зимнего полушария.
- 5) Незональный озон вызывает повышение температуры атмосферы на высотах от 60 до 80 километров над экватором в июне.
- 6) Незональный озон вызывает усиление переноса вдоль круга широты в экваториальной зоне на высотах 60-40 км.
- 7) Незональный озон вызывает ослабление переноса вдоль круга широты в тропической зоне зимнего полушария на высотах 40-50 километров.
- 8) Незональный озон вызывает усиление переноса вдоль круга широты в полярных и умеренных широтах зимнего полушария. В северном полушарии на высоте 45 км, в южном на высоте 65 км.

В **Главе 4** рассмотрены принципы построения и описаны особенности практической реализации алгоритма параметризации фотохимии озона, предназначенного для использования в моделях общей циркуляции средней атмосферы.

Современные совместные «циркуляция атмосферы - газовый состав» модели атмосферы отличаются громоздкостью и высокой требовательностью к вычислительным ресурсам, что значительно ограничивает или делает невозможным их применение при решении задач ансамблевого моделирования

климата. Возникает необходимость построения простых параметризационных алгоритмов для описания процессов накопления и разрушения наиболее активных газовых компонент атмосферы.

Обоснование – учет климатических долготных вариаций озона в модели средней и верхней атмосферы МСВА приводит к существенному усилению амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) и к генерации немигрирующих приливов. В свою очередь, долготные вариации озона обусловлены вариациями температуры и ветра в поле СПВ. Для самосогласованного учета долготных вариаций озона в моделях общей циркуляции необходимо их рассчитывать на каждом временном шаге. В простейшем виде это можно сделать при помощи параметризационного алгоритма для учета фотохимии озона. Такой подход успешно применялся в глобальных моделях циркуляции. В данной работе описаны принципы построения и результаты реализации параметризации фотохимии озона, которую планируется использовать в МСВА. Алгоритм позволяет корректно описывать процессы образования глобальных возмущений в поле озона и их проявление в интегральном содержании озона, что чрезвычайно важно для моделирования воздействия озона на циркуляцию средней атмосферы. В рассматриваемом алгоритме было использовано положение о линеаризации фотохимических источников и стоков озона, т.к. продукция и разрушение озона квазилинейны относительно наблюдаемых вариаций озона. Параметризация выполнена на основе модели газового состава SUNY-SPB.

**Глава 5** Для оценки относительной роли процессов ответственных за формирование глобального поля долготных вариаций концентрации озона, а также исследования предполагаемых механизмов обратных связей, автором была создана глобальная модель, описывающая пространственно–временную динамику распределения долготных вариаций озона на основе трехмерного «Offline» – динамического ядра. Модель имеет следующие характеристики: 20 уровней по вертикали (0-60 км), 64 узла по долготе, 36 узлов по широте.

Интегрирование уравнений модели производится конечно-разностным методом в сферических координатах, с использованием схемы Мацуно, шагом по времени - 30 минут.

В ходе проведения экспериментов с моделью, был насчитан ансамбль прогнозов для января месяца, включающий 10 реализаций, различающихся данными о ветре и температуре подаваемыми в динамическое ядро модели.

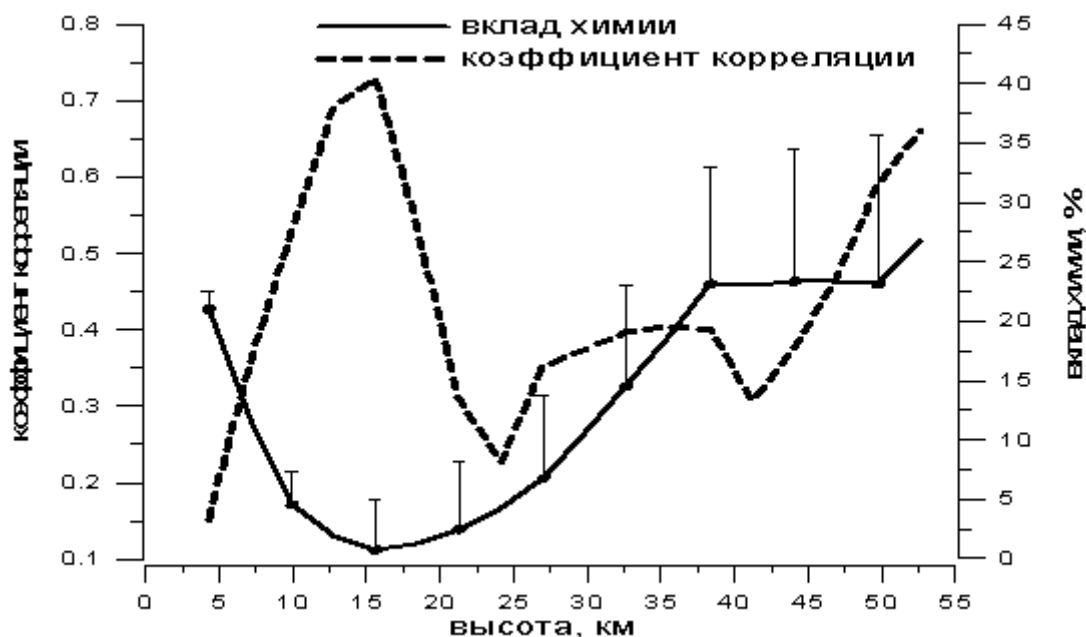


Рисунок 5 Распределение по высотам среднего по ансамблю вклада слагаемых, описывающих фотохимию озона, в формирование его долготных вариаций в северном полушарии. Изменение с высотой корреляции поля долготных вариаций озона в северном полушарии, по данным GOME и результатам моделирования.

Рисунок 5 отражает: среднее по ансамблю распределение вклада динамических и химических факторов в формирование поля долготных вариаций концентрации озона, выраженное в процентах. Как видно из рисунка, вклад фотохимии озона, в сравнении с вкладом адвекции, растет с высотой, достигая максимума на высоте от 40 до 50 км. Это связано, прежде всего, с

ростом влияния вариаций температуры воздуха с высотой. Вторым максимумом наблюдается в нижней тропосфере, и обуславливается спецификой тропосферной химии озона, ее чувствительностью к изменениям локальной и интегральной концентрации озона, - согласно проведенному анализу.

### Заключение

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

1. Разработана и использована в исследованиях оригинальная методика учета влияния незональных вариаций концентрации озона на изменения газового состава и общей циркуляции атмосферы.
2. Получены оценки относительной роли долготных вариаций озона в формировании состава и структуры атмосферы.
3. В результате проведенных экспериментов установлено следующее:
  - Незональный озон проявляет себя наиболее всего в период с марта по июль, а также в ноябре-декабре.
  - Незональный озон проявляет себя наименее всего в январе и сентябре.
  - Незональный озон вызывает понижение температуры стратосферы в полярных широтах зимнего полушария.
  - Незональный озон вызывает повышение температуры атмосферы на высотах от 60 до 80 километров над экватором.
  - Незональный озон вызывает усиление зонального ветра в районе экватора на высотах 60-40 км.
  - Незональный озон вызывает ослабление зонального ветра в тропической зоне зимнего полушария на высотах 40-50 километров.

– Незональный озон вызывает усиление зонального ветра в полярных и умеренных широтах зимнего полушария. В северном полушарии на высоте 45 км, в южном на высоте 65 км.

4. По результатам экспериментов, выполненных с использованием трехмерной глобальной модели долготных вариаций озона, определено наиболее вероятное распределение вклада термодинамических и химических процессов в формирование поля долготных вариаций концентрации озона. А также показано, что вклад фотохимии озона, в сравнении с вкладом процессов адвективного переноса в формирование поля долготных вариаций концентрации озона, растет с высотой, достигая максимума на высотах от 40 до 50 км. Это связано, вероятнее всего, с ростом влияния долготных вариаций температуры воздуха с высотой. Второй максимум наблюдается в нижней тропосфере, что обуславливается спецификой тропосферной химии озона. Одна из особенностей которой заключается в ее чувствительности к изменениям локальной концентрации озона.

#### **Основные публикации по теме диссертации.**

1. Смышляев С.П., Галин В.Я., Моцаков М.А., Шаарибу Г. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих стратосферы полярных регионов. - Физика атмосферы и океана. №3 ст. 265-280, июнь 2010.
2. Моцаков М.А. Смышляев С.П., Параметризация фотохимии озона для использования в моделях общей циркуляции атмосферы. - Ученые Записки РГГМУ №9 ст. 80-85, 2009.
3. Моцаков М.А., О проблеме постановки граничных условий на вложенных сетках. - Ученые Записки РГГМУ №4 ст. 25-31, 2007.

محمد

Моцаков М.А.