

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. Ломоносова**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

На правах рукописи

**КРАМАРОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСЕЕВНА**

УДК 551.510

**Крупномасштабные  
пространственно-временные  
вариации озона и УФ радиации**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы  
физического факультета Московского Государственного  
университета им. М.В. Ломоносова

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук, доцент

Г.И. Кузнецов

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук, профессор

И.К. Ларин

Кандидат физико-математических наук, с.н.с.

А.М. Звягинцев

**Ведущая организация:**

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии  
Наук

Защита состоится «13» декабря 2007 г. в « » часов на заседании  
диссертационного совета по геофизике Д 501.001.63 в Московском  
Государственном университете по адресу: 119992, Москва,  
Ленинские горы, ГСП -2, физический факультет, аудитория « ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического  
факультета МГУ

Автореферат разослан «13 » ноября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.63  
кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

## Общая характеристика работы

В последнее время большую актуальность приобрели проблемы изменения климата на планете, которые определяются как вариациями и трендами парниковых газов, так и изменениями динамики атмосферы. Озон, являясь естественным трассером динамических процессов в стратосфере, в то же время обладает мощным радиационным потенциалом в этой области и сам влияет на стратосферную динамику. В этой связи, важное значение приобретают задачи, связанные с мониторингом изменений озона и обнаружением причинно-следственных связей между вариациями озона и динамикой.

Озон является малой примесью атмосферы, средняя толщина озонного слоя приведенного к нормальным условиям составляет порядка 0,3 см, Но, несмотря на это, он играет важную роль в динамических, радиационных и химических процессах в атмосфере Земли.

Озоновый слой является биологическим щитом, защищающим землю от негативного влияния жесткого УФ излучения. Практически вся УФ радиация с длиной волны меньше 280 нм (УФ-С область спектра) поглощается озоновым слоем атмосферы и не достигает поверхности земли. Общее содержание озона, структура его вертикального распределения и их изменчивость являются важными факторами, определяющими режим приземной биологически активной УФ-Б радиации (280-315 нм).

Озон обладает мощным радиационным потенциалом, как в УФ области спектра, так и в ИК (полоса 9.6 мкм) и, таким образом, является парниковым газом. Кроме того, озон является ключевым газом во многих химических реакциях, протекающих в различных слоях земной атмосферы.

Наблюдаемое в последние десятилетия уменьшение озона в средних и высоких широтах обоих полушарий в весенний период, привлекает пристальное внимание многих исследователей. Для осредненного по всему земному шару общего содержания озона отрицательный тренд по оценкам различных авторов составляет 2.5% - 3% в десятилетие [*Randel et al., Sci. Rev. 1999; Wang et al., J. Geophys. Res. 2002; Fioletov et al., J. Geophys. Res., 2002; Tung, Yang, J. Atmos. Sci., 1994a*]. Наконец, следует отметить широко известную проблему истощения озонового слоя над Антарктикой [*WMO Report N 47, 2002*].

Уменьшение общего содержания озона приводит к росту уровня приземной биологически активной УФ радиации. По данным работы [*Ziemke et al., J. Geophys. Res., 2000*] отмечается 3-7% положительный тренд в десятилетие в зональных значениях УФ облученности, возрастающий от средних широт к высоким.

Для надежной оценки трендов озона и для понимания механизмов управляющих режимом озона, важно оценить вклад естественных

факторов в его крупномасштабную пространственно-временную изменчивость. Основными естественными факторами, вносящими вклад в межгодовую крупномасштабную изменчивость озона, являются солнечная активность (прежде всего 11-ти летний солнечный цикл), процессы глобальной циркуляции (квазидвухлетняя цикличность, явления Эль-Ниньо (Ла-Ниньо)), крупные вулканические извержения, например Пинатубо 1991, Эль-Чичон 1982.

К вопросам изменения климата и, как следствие, изменению условий жизни приковано пристальное внимание общества. В последнее время обсуждаются возможности активного воздействия на геосферу с целью компенсации негативных последствий потепления [Crutzen P.J., *Climate Change*, 2006]. Для надежного прогноза дальнейших сценариев развития климата и для оценки последствий любого рода активных антропогенных воздействий на геосферу, выходящих за рамки годовой и сезонной изменчивости, необходимо детально изучить механизмы естественной изменчивости крупномасштабных, долговременных геофизических факторов, проанализировать сложные обратные связи между ними.

**Актуальность проблемы исследования.** В рамках вышеуказанных проблем исследование крупномасштабной изменчивости озона, чутко реагирующего на изменения радиационного и термобарического полей атмосферы, безусловно, **актуально** и имеет не только самостоятельное значение, но может быть использовано и в задачах анализа и прогноза крупномасштабных атмосферных процессов.

**Целью диссертационной работы** является комплексное экспериментальное исследование крупномасштабных пространственно-временных вариаций полей озона и УФ радиации в различных регионах земли, оценка вклада воздействий ряда естественных факторов динамического и гелиофизического характера в долговременную изменчивость исследуемых величин.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие **задачи**:

1. Проведен сбор и предварительная адаптация данных спутниковых наблюдений TOMS и SBUV последней 8-ой версии. Созданы адаптированные к целям работы базы данных озона и УФ облученности различного временного и пространственного разрешений.
2. Проведено исследование долготно-широтных особенностей сезонной изменчивости ОСО и УФ эритемной облученности в средних широтах Северного полушария (30 с.ш. -60 с.ш.).
3. Изучена межгодовая изменчивость полей ОСО и УФ облученности в высоких широтах Южного полушария (50 ю.ш. -80 ю.ш.) в ноябре – месяце, когда еще наблюдается т. н. «озоновая дыра».

4. На основе созданной адаптированной базы данных вертикальных профилей парциального давления озона впервые исследованы крупномасштабные вариации *трехмерного* распределения озона в тропической области (30 ю.ш. - 30 с.ш.) и обнаружена связь вариаций озона с воздействием ряда естественных факторов (квазидвухлетний цикл, 11-ти летний солнечный цикл, явления Эль-Ниньо (Ла-Ниньо)).
5. Проведено детальное исследование взаимосвязей вертикальной структуры КДЦ колебаний озона с вертикальной структурой зонального ветра в области озонного максимума (10-50 гПа) на экваторе за 15 летний период. Проведена оценка влияния квазидвухлетних вариаций озона на вертикальное распределение УФ радиации в нижней стратосфере.
6. Предложена и апробирована регрессионная модель для расчета долготно-широтных полей среднемесячных значений общего содержания озона в тропиках, основанная на использовании векторов разложения по Естественным Ортогональным Функциям (ЕОФ анализа).
7. Исследованы крупномасштабные вариации долготно-широтных полей приземной УФ эритемной облученности в тропической области (30 ю.ш. - 30 с.ш.). Обнаружена связь вариаций УФ облученности с воздействием квазидвухлетнего и 11-ти летнего солнечного циклов.

#### **Основные методы и средства решения:**

1. Для решения поставленных задач на базе спутниковых измерений TOMS и SBUV созданы адаптированные базы данных озона и УФ облученности для трех регионов:

- а) область средних широт Северного полушария (30 с.ш. -60 с.ш.), отличающаяся большой сезонной изменчивостью озона и УФ радиации. На основе данных TOMS за 2000 год была создана база данных ежедневных долготно-широтных ( $2^0$  ш. x  $10^0$  д.) полей ОСО и УФ эритемной облученности для исследования пространственно-временных закономерностей сезонных вариаций озона и УФ радиации. Предварительно ряды данных были нормированы на среднегодовые значения.

- б) область южных широт, включая область Антарктиды, (50 ю.ш. - 80 ю.ш.), где в последние десятилетия в весенний период наблюдаются аномальные изменения озона и УФ радиации (т.н. «озоновая дыра»). Для исследования крупномасштабных закономерностей межгодовых вариаций озона и УФ радиации была создана база долготно-широтных ( $2^0$  ш. x  $5^0$  д.) полей среднемесячных значений ОСО и УФ эритемной облученности для ноября за 25 лет (1978 - 2002 гг.). Средние многолетние для ноября значения ОСО и УФ облученности за 25 лет были удалены из исходных полей.

- в) область экваториальных и тропических широт (30 ю.ш. -30 с.ш.) – основной источник атмосферного озона, в которой сезонная и

пространственная изменчивость озона и УФ облученности, а также влияние мелкомасштабной циркуляционной активности менее выражены, что позволяет более точно выделять вклады воздействий крупномасштабных явлений циркуляции атмосферы и солнечной активности. Отклики крупномасштабных атмосферных процессов, протекающих в тропическом регионе, обнаруживаются и в вариациях озона в высоких широтах. Поэтому в настоящей работе большое место отведено исследованию крупномасштабных вариаций озона и УФ радиации в тропиках. Для этих исследований создано несколько специализированных баз данных, в числе которых:

- две базы данных долготно-широтных полей ( $2^0$  ш. х  $40^0$  д.) среднемесячных значений общего содержания озона за 25 летний период (январь 1979 - декабрь 2003 г.г.) по данным TOMS и SBUV;
- база данных среднемесячных долготно-широтных полей ( $2^0$  ш. х  $40^0$  д.) эритемной облученности за период ноябрь 1978-июль 2003 гг. по данным TOMS.
- адаптированная база среднемесячных значений парциального давления озона на 15 высотных уровнях на регулярной долготно-широтной сетке ( $2^0$  ш. х  $40^0$  д.) за 25 летний период (1979-2003 гг.) по данным спутниковых измерений SBUV.

Предварительно из исходных рядов данных в тропиках был удален средний многолетний сезонный ход и линейный тренд.

2. Для анализа пространственно-временных особенностей полей озона и УФ облученности в работе применяется один из современных методов статистической обработки полей геофизических параметров - метод разложения по Естественным Ортогональным Функциям (ЕОФ), широко используемый в последнее время в различных геофизических задачах [Дианский, ФАО, 1998; Camp et al. *J. Geophys. Res.*, 2003].

3. Для расчета потоков УФ радиации в экваториальной области использовался модифицированный автором радиационный комплекс для расчета потоковых и яркостных характеристик УФ радиации. В состав комплекса входит несколько радиационных моделей, рассчитывающих радиационные характеристики различными методами, что дает возможность внутренней верификации расчетов. Проведена апробация расчетного комплекса по экспериментальным данным спектральных потоков УФ радиации на Кисловодской Высокогорной Научной Станции (КВНС). Радиационный комплекс использован для уточнения входных параметров радиационного блока модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России.

### **Научная новизна**

- Впервые, на основе указанного выше комплекса методик и созданных адаптированных баз данных, исследована пространственно-временная структура изменчивости озона в ключевых поясах озоносферы: средние

широты Северного полушария, высокие широты Южного полушария (период «антарктической озоновой дыры») и в тропической области.

- Адаптированная база среднемесячных значений парциального давления озона на 15 высотных уровнях на регулярной долготно-широтной сетке за 25 летний период (1979-2003 гг.) по данным спутниковых измерений SBUV была создана впервые. На ее основе впервые проведено исследование трехмерных полей озона в тропиках с помощью EOF метода.
- Впервые выявлены характерные пространственные и временные структуры в полях аномалий трехмерного распределения озона, тесно связанные с естественными факторами, такими как 11-ти летний солнечный цикл, квазидвухлетняя цикличность, явления Эль-Ниньо (Ла-Ниньо). Впервые выполнено детальное исследование вертикальной структуры распределения озона над экватором в слое озонового максимума и проанализированы пространственные, фазовые и временные соотношения между вариациями озона и зонального ветра в соответствующих квазидвухлетних циклах.
- Обнаруженные оригинальные пространственные, временные и фазовые соотношения исследуемых полей изменчивости озона с некоторыми гео- и гелиофизическими факторами использованы в разработанной регрессионной модели для оценки полей среднемесячных значений содержания озона в тропиках, основанной на векторах EOF разложении и проведена оценка точности прогнозов.
- Впервые проведен анализ крупномасштабных вариаций долготно-широтных полей УФ облученности с помощью EOF метода.

**Достоверность** полученных в работе результатов подтверждается их сравнением с результатами экспериментов и данными работ других авторов, в том числе с работами, проведенными ранее на кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ.

#### **Научная и практическая значимость**

Созданная на основе спутниковых измерений SBUV адаптированная трехмерная база данных среднемесячных значений парциального давления озона в тропиках за 25-ти летний период может быть использована в качестве справочного материала по вертикальным профилям озона в тропиках.

Полученные пространственные, временные и фазовые соотношения между крупномасштабными вариациями трехмерных полей озона и рядом гео- и гелиофизических факторов в тропиках и разработанная на этой основе регрессионная модель могут использоваться в прогностических схемах для оценки и уточнения межгодовых вариаций и долговременных трендов озона.

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

1. Результаты исследования долготно-широтной структуры сезонной изменчивости ОСО и УФ эритемной облученности в средних широтах Северного полушария.
2. Результаты исследования долготно-широтной структуры межгодовой изменчивости полей ОСО и УФ облученности (1978-2002 гг.) в ноябре (в период «озоновой дыры») в области высоких широт Южного полушария, в том числе обнаруженные пространственные и временные особенности в вариациях ОСО и УФ облученности, тесно связанные с динамическими процессами атмосферы (циркумполярный вихрь и его разрушение, квазидвухлетняя цикличность).
3. Пространственные, временные и фазовые закономерности крупномасштабных вариаций трехмерного распределения озона в тропической области (30 ю.ш. - 30 с.ш.) и их связь с квазидвухлетним циклом, 11-ти летний циклом солнечной активности и явлениями Эль-Ниньо (Ла-Ниньо).
4. Разработка и верификация регрессионной модели для оценки долготно-широтных полей среднемесячных значений общего содержания озона в тропиках, основанная на векторах ЕОФ метода.
5. Пространственные, временные и фазовые закономерности крупномасштабных вариаций долготно-широтных полей УФ эритемной облученности в тропической области (30 ю.ш. - 30 с.ш.), связанные с воздействием квазидвухлетнего и 11-ти летнего солнечных циклов.
6. Результаты исследования вертикальной структуры квазидвухлетних колебаний озона в сравнении с вертикальной структурой зонального ветра в области озонного максимума (10-50 гПа) на экваторе за 15 летний период. Обнаруженное постоянство фазы квазидвухлетних колебаний озона по высоте в области озонного максимума (10-50 гПа) и сдвиг ее относительно квазидвухлетних вариаций зонального ветра. Оценка влияния квазидвухлетних вариаций озона на величину УФ радиации в экваториальной области.

### **Личный вклад**

Все представленные в работе результаты получены при непосредственном участии автора.

### **Апробация работы**

Результаты представленные в диссертации докладывались на ряде Международных и Всероссийских конференций: Международном Симпозиуме стран СНГ по Атмосферной Радиации (Санкт-Петербург 2004; Санкт-Петербург 2006); Всероссийской школе - конференции молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты" (Москва, 2004; Борок, 2005; Москва, 2006; Нижний Новгород 2007); Научной конференции «Ломоносовские чтения



(секция физики)» (Москва 2005; Москва, 2007); Европейской школеконференции для молодых ученых European Research Course on Atmospheres ERCA (Гренобль, Франция, 2006); Ежегодной Ассамблее Американского геофизического общества AGU (Балтимор, США, 2006); Второй конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государств участников СНГ (Москва, 2006); Четвертой открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2006); Международном симпозиуме «Физика атмосферы: наука и образование», (С.Петербург, Петродворец, 2007); Всероссийской конференции «Развитие системы мониторинга состава атмосферы» (Москва, 2007).

По теме диссертации опубликовано: 3 статьи, в том числе **2 статьи в рецензируемых журналах**, входящих в список Высшей Аттестационной Комиссии (ВАК); 20 работ в сборниках трудов и тезисов Всероссийских и Международных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Объем диссертации составляет 125 страниц, включая 36 рисунков и список литературы на 132 наименований.

**Во введении** обсуждается актуальность исследований, сформулированы цели и задачи, обоснована научная новизна и практическая ценность работы, кратко излагается содержание диссертации по главам, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору современных представлений о крупномасштабных вариациях озона и УФ радиации. Приведены современные оценки долговременных трендов озона и УФ радиации. Кратко изложены общие сведения об особенностях сезонных вариаций озона и его вертикального распределения. Проводится обзор работ по исследованию связи озона с процессами солнечной активности различного временного масштаба. Анализируются работы, посвященные исследованию связи между вариациями озона и динамическими процессами (циклонами, квазидвухлетней цикличностью, Южным колебанием, Североатлантическим колебанием). Дано определение понятия эритемной УФ облученности и приведена методика ее расчета. Приведены литературные данные о воздействии мощных вулканических извержений на режим озона и УФ радиации. Проводится обзор современных методов статистического анализа полей озона и УФ радиации, позволяющих выделять и исследовать крупномасштабные вариации озона и УФ радиации.

**Во второй главе** представлено описание баз данных и методов исследования. В первом разделе главы 2 приводится описание используемых в работе баз данных TOMS и SBUV по озону и УФ эритемной облученности. Проведена большая работа по сбору и

предварительной обработке данных спутниковых наблюдений TOMS, SBUV. В соответствии с поставленной целью диссертационной работы – исследование крупномасштабных пространственно-временных вариаций полей озона и УФ радиации в различных регионах земли - созданы адаптированные к целям работы базы данных общего содержания озона и УФ облученности различного временного и пространственного разрешения для регионов средних широт Северного полушария (30 с.ш. - 60 с.ш.), района высоких широт Южного полушария (50 ю.ш. -80 ю.ш.) и тропической зоны (30 ю.ш. -30 с.ш.). Впервые для исследования пространственного распределения озона создана адаптированная трехмерная база данных среднемесячных значений парциального давления озона на 15 высотных уровнях в тропической области за 25 летний период (1979-2003 гг.) на равномерной долготно-широтной сетке ( $2^0$  ш. x  $40^0$  д.) на основе данных наблюдений SBUV.

**Во втором разделе главы 2** приведено математическое описание метода разложения по Естественным Ортогональным Функциям (ЕОФ) [Дианский, ФАО, 1998]. Метод основан на разложении исходных пространственно-временных полей по ортогональным базисным векторам, которые не задаются заранее, а определяются из самих исходных полей. Этот подход является важным преимуществом, отличающим метод ЕОФ разложения от других методик, в которых используется некая априорная информация об исследуемых полях. В результате ЕОФ разложения мы получаем вектора, описывающие пространственное распределение особенностей, присущих изучаемым полям, и соответствующие коэффициенты разложения, характеризующие временную эволюцию в целом по всему исследуемому полю. Моды ЕОФ анализа располагаются в порядке уменьшения их вклада в дисперсию исходного поля. Таким образом, первые ЕОФ моды описывают максимальную изменчивость исходного пространственно-временного поля. В работе использовался программный комплекс ДИОГИН (Доступ И Обработка Геофизической Информации), разработанный в Институте Вычислительной Математики РАН Дианским Н.А., включающий в себя ЕОФ метод.

**Третий раздел главы 2** посвящен описанию модифицированного радиационного комплекса для расчета потоковых и яркостных характеристик атмосферы. В состав комплекса вошли следующие модели: яркостная радиационная модель, основанная на численном методе последовательных порядков рассеяния; потоковая модель, основанная на приближении Эддингтона; модифицированная потоковая модель, основанная на сочетании дельта аппроксимации и приближения Эддингтона; модель расчета радиационных характеристик атмосферного аэрозоля и облачности, основанная на теории Ми. Комплекс рассчитывает потоковые и яркостные характеристики УФ радиации в атмосфере несколькими независимыми методами, что дает возможность взаимной

верификации и оценки одних характеристик поля радиации по измеренным значениям других. Приводятся результаты верификации радиационного комплекса для случая однородной среды по стандартной методике [Ленобль, 1990]. Также представлены результаты сравнения рассчитанных с помощью численного комплекса спектральных потоков УФ радиации (290-325 нм) с измеренными величинами на КВНС.

В четвертом разделе главы 2 приведены оценки радиационного нагрева верхней стратосферы за счет поглощения озоном солнечной радиации. Распределение поступающей солнечной энергии, как высотное, так и широтное, играет основополагающую роль в формировании климатических условий на земле и зависит от ряда факторов, в котором одну из важнейших ролей играет высотно-широтное распределение поглощающих газов, в том числе и озона. В настоящем разделе проводится оценка радиационной энергетике озона в солнечном диапазоне спектра 180-780 нм, изучается широтно-сезонная изменчивость радиационных потоков и притоков тепла, обусловленных влиянием озона на различных высотах. Для этих целей была сформирована база данных средне климатических профилей парциального давления озона (в нбар) для 81 высотного уровня (от 1013 мбар до 0.10 мбар) для 35 широтных зон ( $85^{\circ}$  ю.ш.- $85^{\circ}$  с.ш. с шагом  $5^{\circ}$ ) для 12 месяцев на основе климатических профилей озона, используемых в системе спутникового мониторинга SBUV.

Расчеты показали, что области максимального нагрева атмосферы за счет поглощения озоном солнечного излучения располагаются вблизи верхней границы модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России. Радиационное нагревание стратосферы неоднородно по широте и зависит от сезона. Широтно-сезонное распределение скорости нагревания озоносферы определяется тремя факторами: высотой солнца, продолжительностью светового дня и вертикальным профилем озона. Максимальные значения скорости нагревания за сутки (до 16 К/сут), согласно расчетам без учета эффектов охлаждения другими газами, наблюдаются в полярных широтах летнего полушария на уровне 47 км: в январе – в Антарктической области, в июле – в Арктической. По результатам этих работ даны рекомендации для уточнения входных данных по озону для спектральной модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России.

**Третья глава** посвящена исследованию сезонной, межгодовой и крупномасштабной изменчивости долготно-широтных полей ОСО и УФ эритемной облученности.

В первом разделе главы 3 исследуются долготно-широтные особенности сезонной изменчивости ОСО и УФ эритемной облученности в средних широтах Северного полушария на примере ЕОФ анализа ежедневных полей за 2000 год. Предварительно исходные ряды данных

были нормированы на среднегодовые значения. Показано, что режимом сезонных вариаций ОСО управляют преимущественно динамические факторы (порядка 50% сезонной изменчивости озона), вклад солнечной инсоляции составляет порядка 11-15%. Обнаружены долготные структуры в пространственном распределении сезонных вариаций озона, тесно связанные с барическими гребнями и ложбинами на уровне 100 мбар. Главным фактором, определяющим режим сезонных вариаций УФ радиации (ЕОФ-1, описывает порядка 80% изменчивости) является сезонная изменчивость величины солнечной инсоляции в Северном полушарии. В пространственном распределении четко выделяются области орографических аномалий над Северной Америкой и Евразией.

**Во втором разделе главы 3** изучается межгодовая изменчивость полей среднемесячных значений ОСО и УФ облученности в ноябре в Антарктической области. Ноябрь – последний весенний месяц, в течение которого все еще наблюдаются аномально низкие значения ОСО над Антарктикой. Предварительно из исходных данных были удалены средние за 25 лет значения для ноября. Анализ полей среднемесячных значений ОСО и УФ эритемной облученности в Антарктике для ноября за 25-ти летний период (1978 – 2002 г.г.) обнаружил тесную связь вариаций исследуемых величин с характерными для этого периода динамическими процессами: циркумполярный вихрь и его разрушение, а также с экваториальным КДЦ ветра. Кроме того, наблюдается тесная связь между вариациями ОСО и изменениями УФ облученности, что видно при анализе как пространственных ЕОФ векторов, так и соответствующих временных коэффициентов. Этот факт показывает, что основным фактором, влияющим на формирование потоков УФ радиации над Антарктикой в этот период, является ОСО.

**Третий раздел главы 3** посвящен исследованию крупномасштабных вариаций полей ОСО и УФ облученности в тропиках с помощью ЕОФ метода. В качестве исходных данных использовались долготно-широтные поля среднемесячных значений общего содержания озона за 25 летний период (январь 1979 - декабрь 2003 г.г.) по данным TOMS и SBUV и УФ эритемной облученности за период ноябрь 1978 - июль 2003 гг. по данным TOMS в тропической области (30 ю.ш. – 30 с.ш.) с пространственным разрешением  $4^0$  по широте и  $40^0$  по долготе. В исходных базах данных с помощью стандартных методик были удалены сезонный ход и тренд за исследуемый период. Отметим, что величина тренда на экваторе оказалась статистически незначима, однако к субтропикам его величина возрастает до значений  $\sim -3$  е.Д./за десятилетие, что согласуется с данными работ [Randel et al., *Sci. Rev.* 1999; Bojkov, Fioletov, *J. Geophys. Res.*, 1995; Wang et al., *J. Geophys. Res.*, 2002].

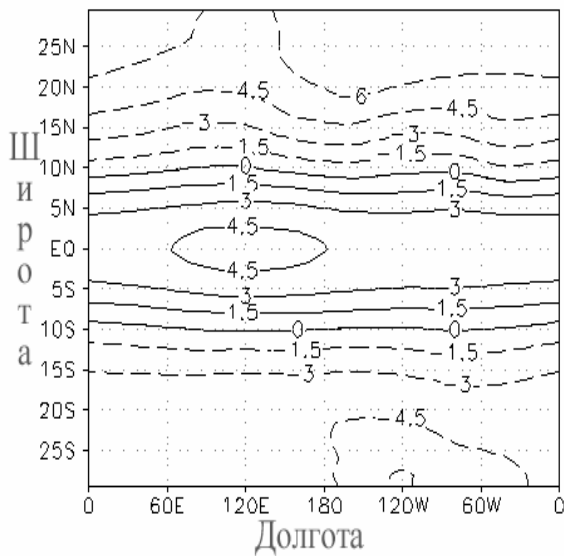
Выделены характерные пространственные, временные и фазовые структуры в полях аномалий ОСО, тесно связанные с солнечной активностью и с элементами общей циркуляции атмосферы, такими как 11-ти летний солнечный цикл (ЕОФ 1), квазидвухлетние колебания (ЕОФ 2), колебаниями с периодом  $\sim 20$  месяцев (ЕОФ 3), представляющих собой интерференционное взаимодействие годового и квазидвухлетнего циклов (КДГЦ), и явлениями Эль-Ниньо (Ла-Ниньо) (ЕОФ 4). На рис. 1-4 представлены первые четыре ЕОФ моды.

Показано, что примерно 31-36% вариаций аномалий ОСО в тропической области ( $30^{\circ}$  ю.ш. -  $30^{\circ}$  с.ш.) связаны с квазидвухлетней цикличностью в стратосфере. В западной фазе КДЦ нисходящие движения воздушных масс в экваториальной стратосфере приводят к нарастанию концентрации ОСО над экватором, а происходящие в то же время восходящие движения в субтропиках - к уменьшению ОСО. Обратная ситуация характерна для восточной фазы КДЦ. За индекс КДЦ принято считать зональный ветер на уровне 30 мбар в Сингапуре, положительные значения которого соответствуют западной фазе КДЦ, а отрицательные - восточной. Амплитуда вариаций ОСО, связанных с КДЦ, составляет порядка 6.5-8 е.Д. на экваторе и 8-11 е.Д. в субтропиках. Смена фазы КДЦ колебаний ОСО происходит  $\sim$  на  $10^{\circ}$  широты в обоих полушариях. Следует отметить обнаруженное опережение КДЦ сигнала в ОСО на 3 месяца по сравнению с индексом КДЦ (рис. 1, б).

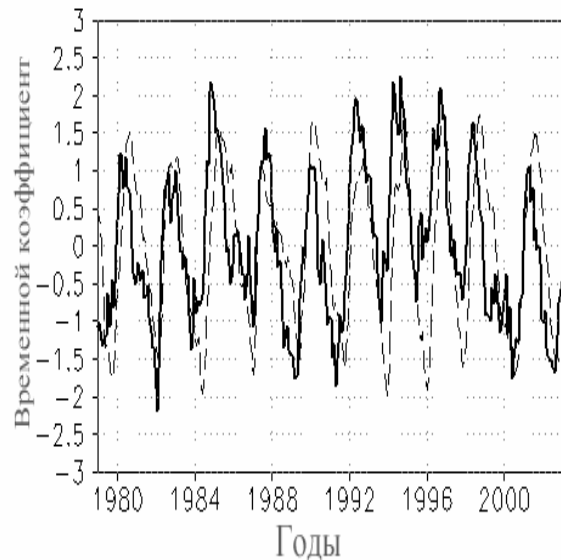
Повышение солнечной активности в 11-ти летнем цикле приводит к увеличению генерации озона и повышению ОСО. 25% низкочастотных вариаций аномалий ОСО в тропиках связано с 11-ти летним солнечным циклом с максимальными амплитудами на экваторе (порядка 9-12 е.Д.) и существенно меньшими в субтропиках (порядка 1.5-3 е.Д.).

Выделены колебания ОСО с периодом около 20,4 месяца, представляющие собой интерференцию годового и квазидвухлетнего цикла (КДГЦ) (15% остаточной изменчивости). КДГЦ колебания ОСО происходят в противофазе в южном и северном полушариях с несколько смещенной в южное полушарие ( $5^{\circ}$  ю.ш.) границей. Максимальные величины амплитуд наблюдаются в субтропиках (порядка 4.5-8 е.Д.).

Порядка 4% остаточной изменчивости ОСО связано с явлениями Эль-Ниньо (Ла-Ниньо). В поле ОСО четко выделяется дипольная структура в регионе Тихого океана. В период Эль-Ниньо наблюдается понижение озона в восточной области Тихого океана вдоль берегов Америки и повышение озона в западной области Тихого океана над Индонезией. Обратная ситуация характерна для фазы Ла-Ниньо. Амплитуда вариаций ОСО, связанных с явлениями Эль-Ниньо (Ла-Ниньо), может достигать 3-6 е.Д.

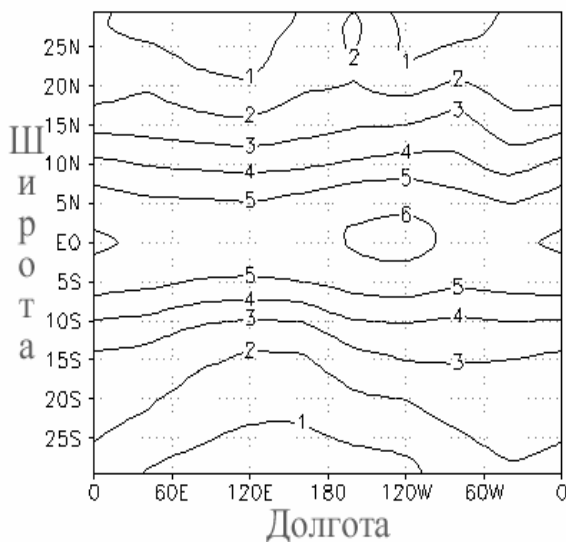


**1, а**

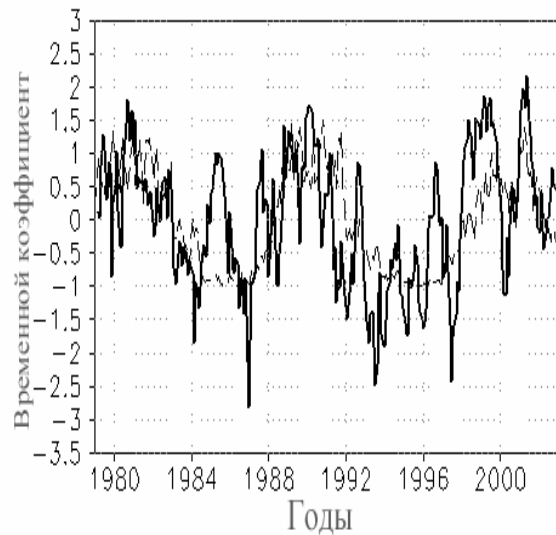


**1, б**

**Рисунок 1.** Первая ЕОФ мода аномалий ОСО по данным SBUV (описывает 36% остаточной изменчивости ОСО в тропиках). Первая мода отражает связь ОСО с КДЦ. На рисунке а) представлено пространственное (долгота x широта) распределение ЕОФ-1 в величинах аномалий ОСО (е.Д.), а на рисунке б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с индексом КДЦ (пунктирная линия). Коэффициент корреляции между двумя кривыми равен 0,64. Величина вариаций ОСО, связанная с данной ЕОФ модой, получается путем умножения значений пространственного вектора на соответствующий временной коэффициент.

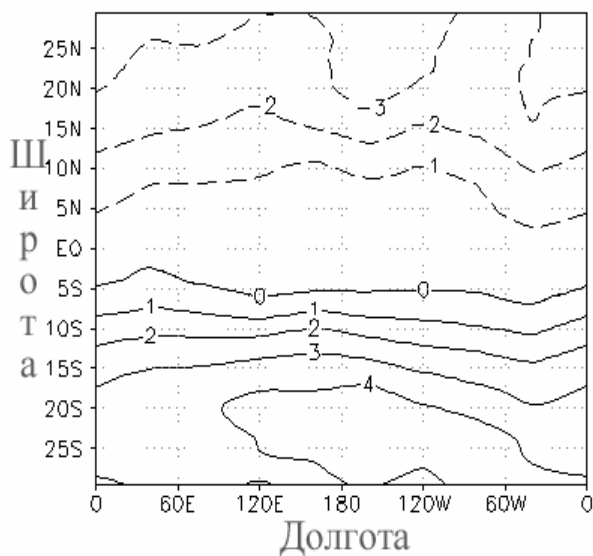


**2, а**

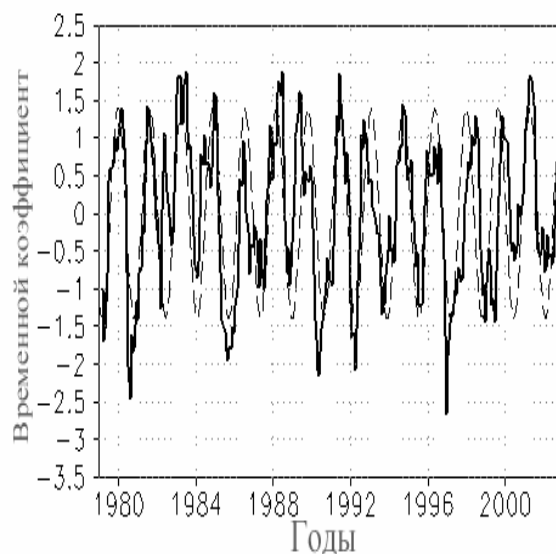


**2, б**

**Рисунок 2.** То же что и на рис.1 только для второй ЕОФ моды аномалий ОСО (25% изменчивости), связанной с 11-ти летним Солнечным циклом. На рисунке а) пространственное (долгота x широта) распределение ЕОФ-2 (е.Д.); на рисунке б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с солнечным потоком на 10,7 см (пунктирная линия), коэффициент корреляции 0,6.

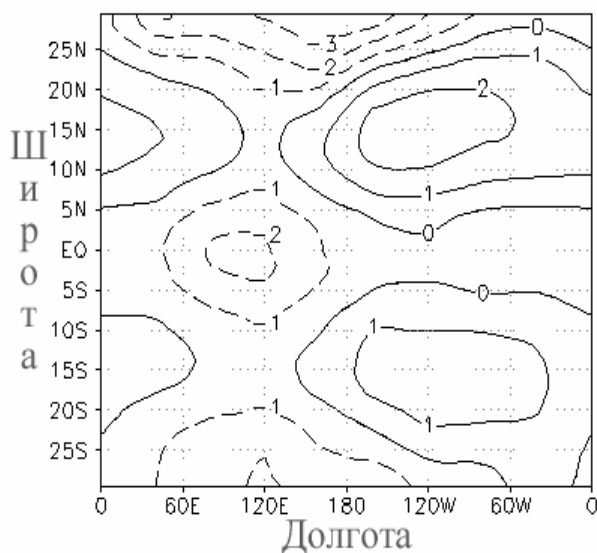


3, а

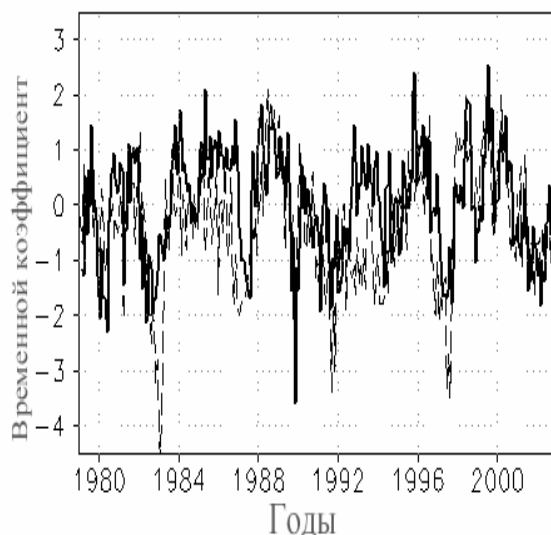


3, б

**Рисунок 3.** То же что и на рис.1 только для третьей ЕОФ моды аномалий ОСО (описывает 15% изменчивости). Третья мода отражает связь общего озона с КДГЦ. На рисунке а) пространственное (долгота x широта) распределение ЕОФ-3 (е.Д.); на рисунке б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с гармонической функцией с периодом 20,4 месяца (пунктирная линия), коэффициент корреляции 0,6.



4, а



4, б

**Рисунок 4.** То же что и на рис.1 только для четвертой ЕОФ моды аномалий ОСО (описывает 4% изменчивости), связанной с явлениями Эль-Ниньо (Ла-Ниньо). На рисунке а) пространственное (долгота x широта) распределение ЕОФ-4 (е.Д.); на рисунке б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с индексом Южной осцилляции (пунктирная линия), коэффициент корреляции 0,6.

Первые четыре ЕОФ моды аномалий ОСО в тропиках описывают более 75% низкочастотной изменчивости озона в регионе. Этот факт дает возможность разработать регрессионную модель для расчета долготно-широтных полей среднемесячных значений ОСО в тропиках, основанную на ЕОФ разложении. Проведено сравнение рассчитанных по модели полей ОСО с результатами измерений TOMS для периода январь 2004 г. – март 2005 г. Относительное отклонение между модельными оценками и данными измерений лежит в пределах 2-6%, и лишь в субтропиках может достигать 10%.

Анализ полей аномалий УФ эритемной облученности показал, что 12% низкочастотных колебаний УФ облученности в тропиках связано с квазидвухлетним циклом. В экваториальной зоне в течение западной фазы КДЦ УФ эритемная облученность уменьшается, а в субтропиках возрастает. Противоположная ситуация наблюдается в течение восточной фазы. Однако амплитуда этих колебаний УФ облученности на экваторе (порядка 10-15 Дж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>) существенно больше, чем в субтропиках (4-8 Дж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>). Также была выделена связь УФ эритемной облученности в тропиках с 11-ти летним солнечным циклом (9.5% изменчивости). В годы максимума солнечной активности уровень приземной УФ облученности снижается. Амплитуда может достигать 7-15 Дж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> в экваториальной зоне и порядка 4 Дж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> в субтропиках.

**Четвертая глава** посвящена исследованию крупномасштабных вариаций трехмерных полей парциального давления озона и УФ радиации в тропическом регионе. Средняя стратосфера тропических широт является источником озона на планете [Хргиан, 1973], который из этой области уходит и распространяется в высокие широты, главным образом зимнего полушария, меридиональными движениями воздуха. Вертикальное распределение озона (ВРО) носит отпечаток ряда процессов, образующих и перераспределяющих озон в атмосфере. Равно оно отражает многие, иногда глобальные, иногда очень тонкие особенности строения самой атмосферы [Хргиан, Кузнецов, 1981]. Изучение особенностей ВРО имеет важное значение для понимания всего баланса озона в земной атмосфере.

Для поставленной задачи была создана адаптированная трехмерная база среднемесячных значений концентрации озона (в нбар) на регулярной сетке с разрешением 2° по широте и 40° по долготе для 15 высотных уровней в тропической области (30 ю.ш. – 30 с.ш.) за 25-ти летний период на основе спутниковых наблюдений SBUV. Сезонный ход и линейный тренд за исследуемый период были удалены. В рассматриваемый период с 1979- 2003 гг в тропической области произошло два крупных извержений Эль-Чичон и Пинатубо, оказавших влияние на содержание озона. Поскольку целью исследования является изучение крупномасштабных вариаций озона, то в широтных областях, где проявлялись аномалии озона, связанные с извержениями, было проведено сглаживание рядов озона в

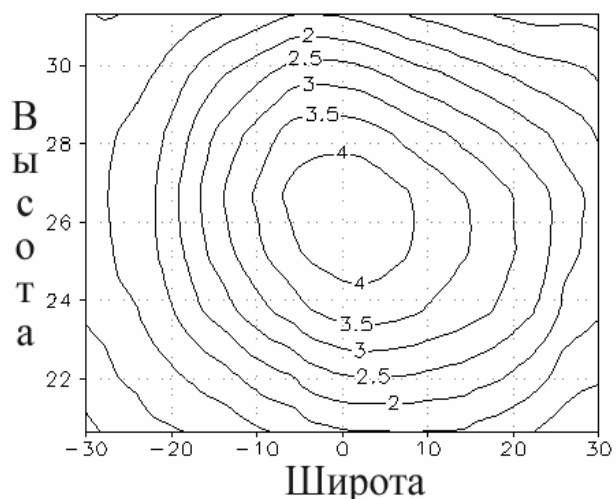


течение 12 месяцев после извержения вулканов, полагая, что за год происходит основная часть процесса восстановления озона после извержения.

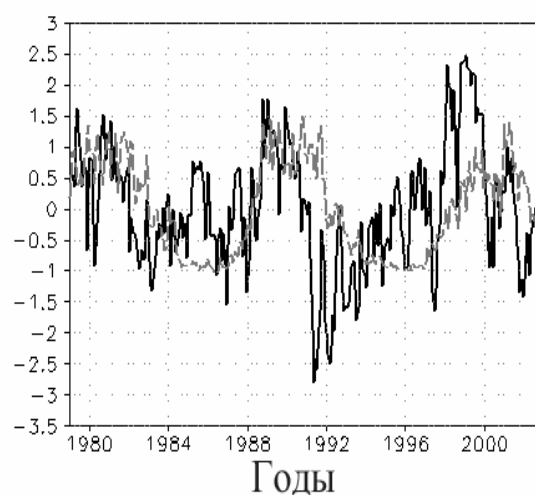
**В первом разделе главы 4** проведен как ЕОФ анализ долгопериодных полей парциального давления озона на заданном высотном уровне, так и ЕОФ анализ высотно-широтных полей зональных значений парциального давления озона. ЕОФ анализ показал, что порядка 75-80% остаточной изменчивости озона в тропической области объясняется естественными факторами, такими как 11-ти летний Солнечный цикл, КДЦ и КДГЦ. Наблюдается высотная зависимость вкладов различных факторов в изменчивость озона. На рис. 5-7 представлены три первых моды ЕОФ анализа высотно-широтных полей среднемесячных зональных значений парциального давления озона в высотной области озонового максимума (10-50 гПа), где проявляется вклад всех вышеуказанных процессов.

Первая ЕОФ мода остаточной изменчивости парциального давления озона связана с 11-ти летним солнечным циклом. Вклад 11-ти летнего цикла в изменчивость озона уменьшается с уменьшением высоты. На высотных уровнях 0,5 и 1 гПа с солнечным циклом связано 75% остаточной изменчивости парциального давления озона, а на высоте 50 гПа - лишь 37%. Однако максимум вариаций озона в абсолютных величинах (до 12 нбар), обусловленных 11-ти летним солнечным циклом, располагается на уровне 26 км (30 гПа) – в слое максимума ВРО (рис. 5, а). В целом, увеличение солнечной активности приводит к повышению фотохимической генерации озона и росту его концентрации по всей высотной области 50 гПа - 0,5 гПа.

Вторая ЕОФ мода остаточной изменчивости среднемесячных значений парциального давления озона связана с КДЦ и четко проявляется в слое 50- 7 гПа. Ее вклад в остаточную изменчивость озона составляет порядка 19-24%. В широтно-высотном распределении второго ЕОФ вектора (рис 6, а) четко разделяются экваториальная и субтропическая зоны КДЦ вариаций озона, колебания в которых происходят в противофазах. Граница раздела проходит в области 10-15° в обоих полушариях и зависит от высоты. Следует отметить несимметричность КДЦ колебаний озона в северных и южных субтропиках: в северных субтропиках по сравнению с южными КДЦ вариации озона простираются существенно выше, вплоть до 7-5 гПа и имеют большую амплитуду. Высотный максимум КДЦ вариаций располагается на уровне 30 гПа с амплитудой 6-7 нбар. Следует отметить опережение КДЦ сигнала в озоне по сравнению с индексом КДЦ. Корреляционный анализ показал, что **опережение** в среднем составляет 3 месяца (рис 6, б).

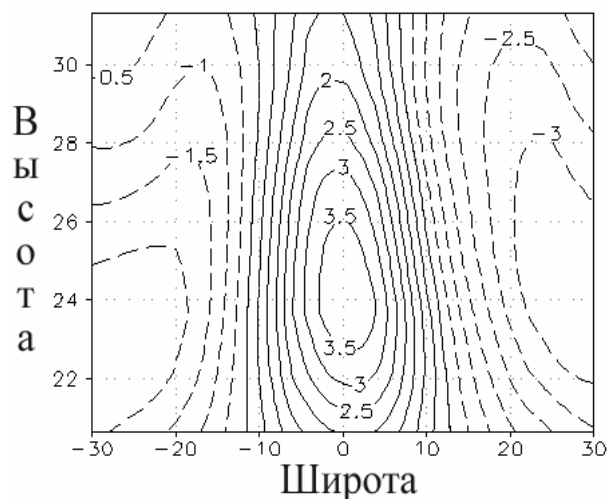


5, а

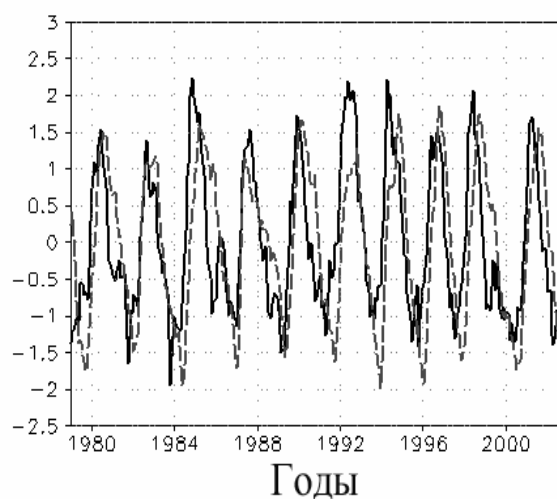


5, б.

**Рисунок 5.** Первая ЕОФ мода аномалий среднемесячных зональных значений парциального давления озона по данным SBUV (35% долгопериодной изменчивости озона в тропиках). Первая мода отражает связь озона с 11-ти летним Солнечным циклом. На рисунке а) представлено пространственное (широта x высота) распределение ЕОФ-1 в величинах аномалий парциального давления озона (нбар.), а на рисунке б) временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с индексом 11-ти летнего солнечного цикла (пунктирная линия). Коэффициент корреляции между ними равен 0,5. Отрицательные значения широты соответствуют Южному полушарию, а положительные – Северному.

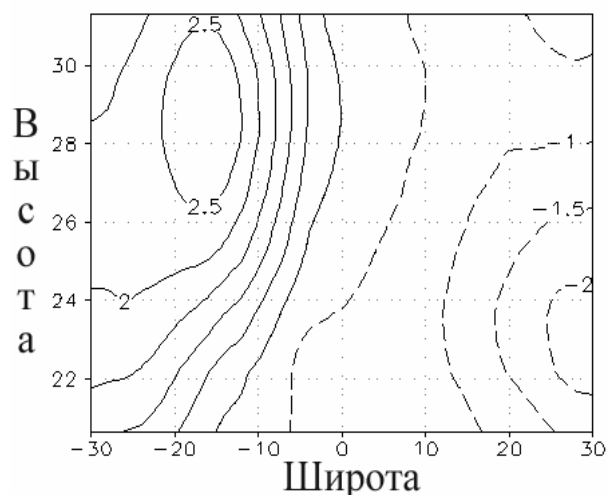


6, а

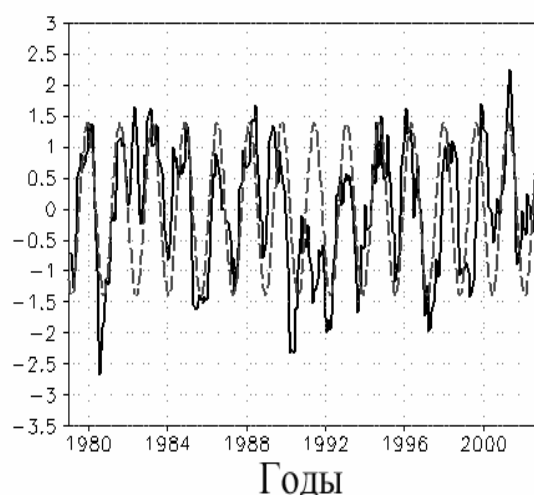


6, б.

**Рисунок 6.** То же что и на рис.5 только для второй ЕОФ моды аномалий среднемесячных зональных значений парциального давления озона (описывает 24% изменчивости), связанной с квазидвухлетним циклом. а) пространственное (широта x высота) распределение ЕОФ-2 (нбар), б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с индексом КДЦ (пунктирная линия), коэффициент корреляции 0,8.



7, а

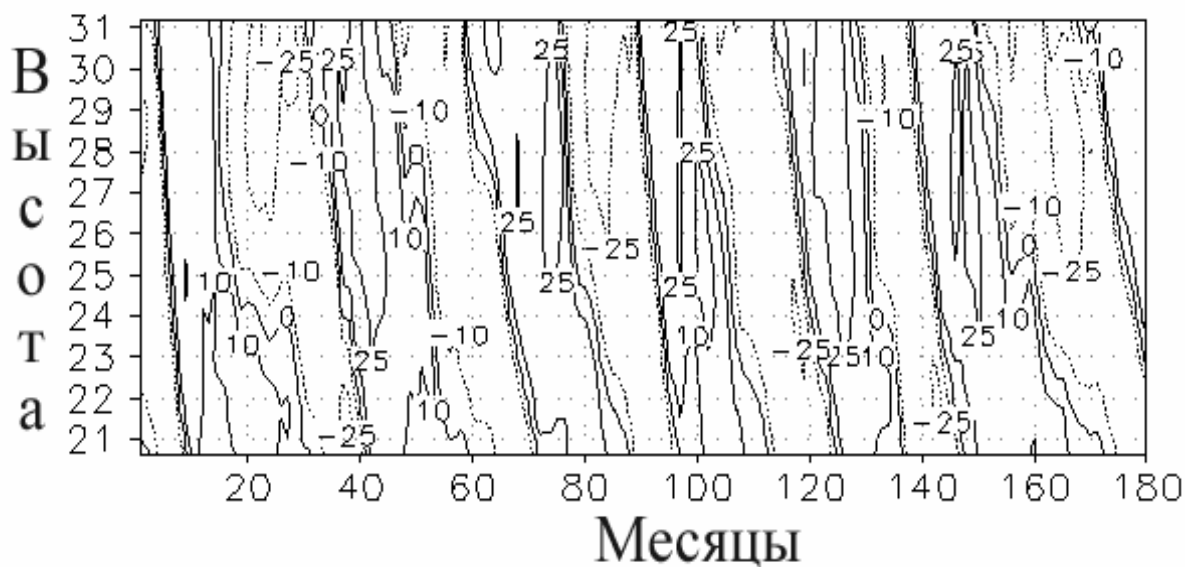


7, б.

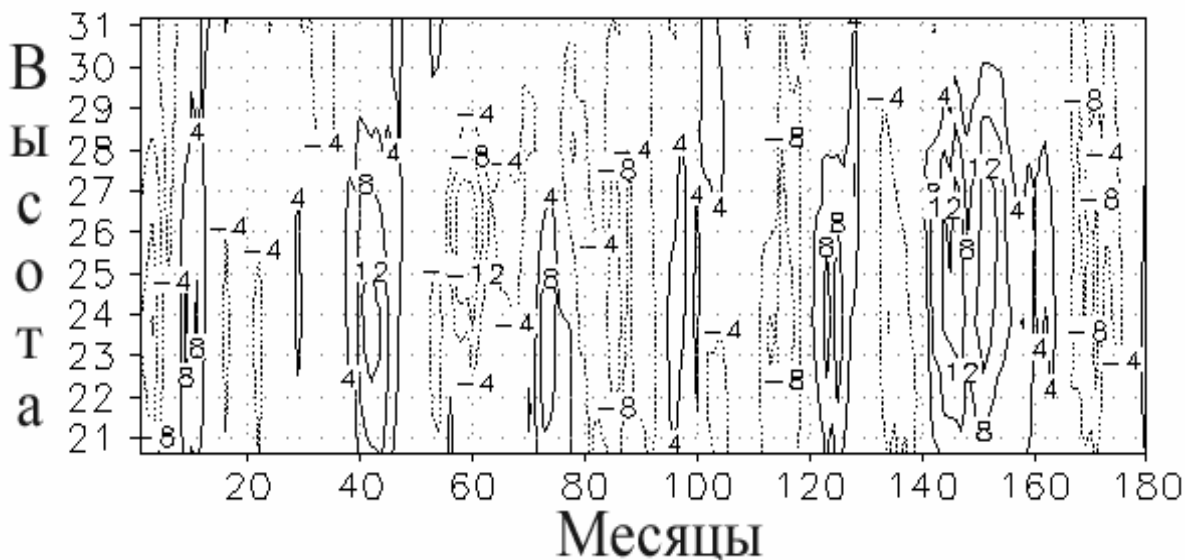
**Рисунок 7.** То же что и на рис.5 только для третьей ЕОФ моды аномалий среднемесячных зональных значений парциального давления озона (описывает 16% изменчивости), связанной с КДГЦ. а) пространственное (широта x высота) распределение ЕОФ-3 (нбар), б) соответствующий временной коэффициент (сплошная линия) в сравнении с гармонической функцией с периодом 20,4 месяца (пунктирная линия), коэффициент корреляции 0,6.

Влияние КДГЦ проявляется так же, как и КДЦ на высотах 7-50 гПа и описывает 10-17% изменчивости парциального давления озона. На рисунке 7 представлена третья ЕОФ мода изменчивости среднемесячных зональных значений парциального давления озона в слое 50-10 гПа, связанная с КДГЦ. Колебания озона в Южном и Северном полушариях происходят в противофазе (рис. 7, а). Широтная граница смены фазы зависит от высоты. Высотный максимум КДГЦ вариаций расположен на уровне 10-15 гПа в Южном полушарии с амплитудой порядка 4-5 нбар. В Северном полушарии область максимальных аномалий расположена значительно ниже, на уровне порядка 40 гПа с амплитудой 3-4 нбар.

**Второй раздел главы 4** посвящен исследованию механизмов КДЦ колебаний озона на экваторе. Проведен анализ вертикальных профилей среднемесячных значений парциального давления озона и зонального ветра на экваторе за 15 лет (январь 1987-декабрь 2001) в высотном интервале 50 гПа - 10 гПа. Среднемесячные значения зонального ветра в Сингапуре были взяты по данным Метеорологического института Открытого Университета Берлина (<http://strat27.met.fu-berlin.de/products/cdrom/data/qbo/>). Сезонный ход и линейный тренд из обоих рядов данных были удалены.



8, а



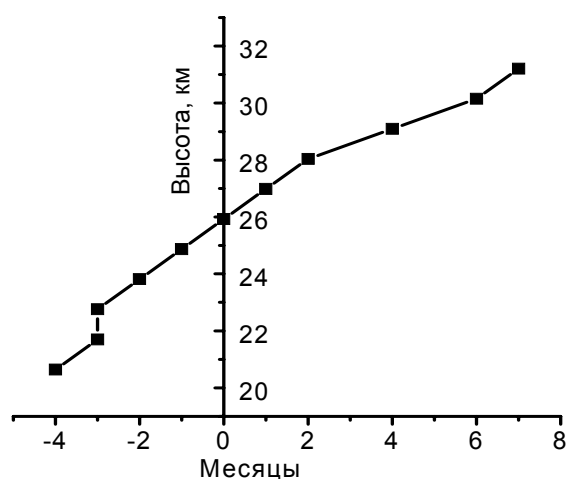
8, б

**Рисунок 8.** На верхнем рисунке а) представлена высотно-временная зависимость аномалий среднемесячных значений зонального ветра на экваторе в слое между 50-10 гПа. На нижнем б) - высотно-временная зависимость аномалий среднемесячных значений парциального давления озона на экваторе в слое между 50-10 гПа. Начало временной шкалы соответствует январю 1987 г.

На рисунке 8 представлены высотно-временные зависимости среднемесячных значений аномалий зонального ветра (рис. 8, а) и парциального давления озона (рис. 8, б) на экваторе в высотной области 50-10 гПа за 15 лет. Видно, что во время западной фазы КДЦ, когда происходят нисходящие движения воздушных масс в экваториальной стратосфере, наблюдается увеличение концентрации озона. Значения аномалий концентрации озона могут достигать 8-12 нбар с максимумом в

высотном слое 24-26 км. Во время восточной фазы КДЦ происходит уменьшение концентрации озона. Кроме того, из рисунков видно, что изолинии зонального ветра имеют наклон относительно шкалы времени, т.е. определенная фаза зонального ветра постепенно опускается вниз со средней скоростью 1 км/месяц [Baldwin et al, 2003]. Изолинии аномалий озона располагаются вдоль вертикали. Таким образом, в фиксированный момент времени наблюдаются одинаковые значения аномалий концентрации озона во всем высотном слое 20-30 км. Отметим, что этот слой характеризуется максимумом ВРО над экватором (25-26 км) со слабыми, противоположного знака градиентами концентрации озона выше и ниже максимума.

На рисунке 9 представлена высотная зависимость временных сдвигов максимальных значений коэффициента корреляции между временными рядами среднемесячных значений парциального давления озона и зонального ветра на фиксированном высотном уровне. Корреляционный анализ показал, что на уровне 32 км колебания озона отстают от колебаний зонального ветра на той же высоте на 6-7 месяцев, на высоте 26 км временного сдвига не наблюдается, а на 20 км вариации озона опережают ветер на 4



**Рисунок 9.** Временной сдвиг максимальных значений коэффициента корреляции между аномалиями среднемесячных значений парциального давления озона и зонального ветра на заданном высотном уровне.

полученных результатов можно сделать вывод, что фаза квазидвухлетних вариаций парциального давления озона по высоте в слое 10-50 гПа не меняется.

**В третьем разделе главы 4** проведена оценка откликов вертикального распределения УФ радиации над экватором на квазидвухлетние вариации озона. Были рассчитаны значения потоков на длине волны 310 нм в период с июля 1994 по декабрь 1996 (один КДЦ

месяца.

Проведенный взаимно корреляционный анализ между временными рядами озона на различных уровнях в слое озонного максимума (10-50 гПа) показал, что наблюдается значимая положительная корреляция между вариациями озона на всех высотных уровнях. Исключение составляет лишь уровень 10 мбар, вариации озона на котором коррелируют лишь с близлежащим высотным уровнем 15 мбар. Из

цикл) для условий экваториальной области. Длина волны 310 нм выбрана, поскольку именно на эту длину волны приходится максимум в спектре УФ эритемной облученности. Расчеты проводились с помощью радиационного комплекса, представленного в главе 2, для полуденных значений солнечного зенитного угла (облачность и аэрозольное ослабление не учитывались). Необходимые для расчетов вертикальные профили давления и температуры экваториальной атмосферы в исследуемый период, были взяты по данным реанализа NCEP/NCAR.

Расчеты показали, что увеличение концентрации озона в западной фазе квазидвухлетних колебаний приводит к уменьшению УФ радиации в слое максимальных концентраций озона (10-50 гПа) с амплитудой для эффективного потока до 5 мВт/(м<sup>2</sup>нм), а уменьшение озона в восточной фазе ведет к росту УФ радиации.

**В заключении** представлены основные выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ долготно-широтной структуры сезонной изменчивости общего содержания озона (ОСО) и УФ эритемной облученности в средних широтах Северного полушария. Обнаружены долготные структуры в сезонном распределении ОСО, связанные с барическими гребнями и ложбинами. Проведена оценка вкладов солнечной инсоляции и динамических факторов в сезонную изменчивость исследуемых величин.
2. Исследования долготно-широтной структуры межгодовой изменчивости полей ОСО и УФ облученности в ноябре в высоких широтах Южного полушария за 25-ти летний период показали тесную связь вариаций исследуемых величин с динамическими процессами (циркумполярный вихрь и его разделение, квазидвухлетняя цикличность).
3. Обнаружены и исследованы пространственные, временные и фазовые закономерности крупномасштабных вариаций озона в тропической области (30 ю.ш. - 30 с.ш.). Показано, что порядка 70-80% крупномасштабной изменчивости озона в тропиках связано с естественными факторами, такими, как 11-ти летний цикл солнечной активности, квазидвухлетняя цикличность, явления Эль-Ниньо (Ла-Ниньо). Вклад перечисленных факторов в изменчивость озона зависит от высоты, широты и долготы.
4. Разработана регрессионная модель для расчета долготно-широтных полей среднемесячных значений ОСО в тропиках, основанная на векторах EOF метода. Проведено сравнение модельных полей с результатами измерений TOMS для периода январь 2004 г. – март 2005 г., относительное отклонение лежит в пределах 2-6% и лишь в субтропиках может достигать 10%.

5. Проведено исследование пространственных, временных и фазовых закономерностей крупномасштабных вариаций долготно-широтных полей УФ эритемной облученности в тропиках. EOF анализ показал, что 12% крупномасштабной изменчивости УФ облученности в тропиках связано с квазидвухлетним циклом, а 9,5% изменчивости - с 11-ти летним циклом солнечной активности.

6. Исследование вертикальной структуры квазидвухлетних колебаний озона в сравнении с вертикальной структурой зонального ветра в области озонного максимума (10-50 гПа) на экваторе за 15 летний период обнаружило постоянство фазы квазидвухлетних колебаний озона по высоте в области озонного максимума (10-50 гПа) и сдвиг ее относительно квазидвухлетних вариаций зонального ветра. Проведена оценка влияния квазидвухлетних вариаций озона на величину УФ радиации в экваториальной области.

#### **Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

1. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Исследование связи долговременных вариаций общего содержания озона и УФ-облученности с общей циркуляцией в тропической области, Вестник Московского Университета, серия «Физика и Астрономия», вып. 3, 2006, стр. 68-74.
2. Крамарова Н.А., Воздействие некоторых гео и гелиофизических факторов на изменчивость полей озона и УФ облученности в тропиках, Известия РАН, серия «Физика атмосферы и океана», том 44, № 1, 2008, (в печати).
3. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Манойло А.В., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Влияние полетов стратосферной авиации на режим солнечного ультрафиолетового излучения и образование аномалий в озонном слое Земли // труды конференции молодых ученых «Малые примеси в атмосфере», Москва, апрель 1998 г., препринт Института Физики Атмосферы, №4, 1998, стр. 7-25.
4. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Тарасова О.А., Савиных В.В., Использование модельного комплекса для оценки радиационных характеристик УФ радиации и режима приземного озона в районе КВНС, Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-2004), СПбГУ, 22-25 июня, Санкт-Петербург 2004, стр. 67-68.
5. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Анализ пространственно-временных полей ОСО, УФ эритемной облученности и атмосферного альbedo по данным спутниковых наблюдений TOMS 8 с помощью SVD и EOF методов, сборник тезисов докладов научной конференции «Ломоносовские чтения (секция физики)», Москва, физический факультет МГУ, 2005, стр. 119-122.

6. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Использование спутниковых измерений TOMS и SBUV для анализа связи озона с особенностями общей циркуляции и солнечной активностью в тропиках, Сборник тезисов Четвёртой всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г., № 119.
7. Kramarova N.A., Kuznetsov G.I., On Relations Between the Ozonosphere and the General Atmospheric Circulation in Tropics, Eos Trans. AGU, 87(36), May-June 2006, Jt. Assem. Suppl., Abstract A23A-04, A23A-04.
8. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Исследование долгопериодных вариаций высотного распределения озона в тропиках и связь с элементами глобальной циркуляции и солнечной активностью, сборник тезисов докладов научной конференции «Ломоносовские чтения (секция физики)», Москва, физический факультет МГУ, 2007г, стр. 155-157.
9. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., Исследование пространственно-временных особенностей распределения озона и УФ облученности по данным спутниковых наблюдений TOMS 8 и SBUV 8, Статья в сборнике «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» № 14, 2007, Москва, «Макс-пресс», стр. 163-176.
10. Крамарова Н.А., Кузнецов Г.И., О связи долгопериодных вариаций высотного распределения озона в тропиках с элементами глобальной циркуляции и солнечной активностью, В сборнике тезисов международного симпозиума “Физика атмосферы: наука и образование” (11-13 сентября 2007), Санкт-Петербург - Петродворец, стр. 249-253.