

На правах рукописи

РУБЛЕВА Татьяна Васильевна



**Исследование изменчивости глобального поля озона  
на основе метода атмосферного трассера**

05.11.13 – Приборы и методы контроля окружающей среды, веществ,  
материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск - 2012

Работа выполнена на кафедре теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Кашкин Валентин Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Черемисин Александр Алексеевич  
кандидат технических наук,  
доцент Сакаш Ирина Юрьевна

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических  
и экологических систем  
Сибирского отделения РАН (г. Томск)

Защита диссертации состоится « 2 » марта 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ212.099.05 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. УЛК 1-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан « 2 » февраля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Непомнящий О. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время проблему озонового слоя Земли ставят в число наиболее значимых глобальных проблем, связанных с сохранением природной среды. Озоносфера не пропускает солнечное излучение короче 290 нм, при исходной величине которого органическая жизнь в ее современном виде была бы невозможной. Если собрать весь озон в слой при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°C, то толщина этого слоя, т.е. общее содержание озона (ОСО), составит около 3 мм или 300 единиц Добсона (е.Д., 1е.Д.=10<sup>-3</sup>см).

С экологической точки зрения, наиболее важен стратосферный озон, максимум концентрации которого на разных широтах приходится на высоты 16-25 км (нижняя стратосфера). К сожалению, общее количество озона в атмосфере постепенно уменьшается, в Антарктике образуется обширная озоновая дыра. Неустойчивые молекулы озона в естественных условиях образуются и распадаются под действием различных природных факторов.

В рамках проблемы деградации озонового слоя в качестве основной причины его истощения указывается на фотохимическое разрушение озона антропогенными факторами. В 1973 г. Ш. Роуланд и М. Молина обнаружили, что фреоны (хлорфторуглероды) могут разрушать стратосферный озон. В 1977 г. был выработан план действий по защите озонового слоя от антропогенного воздействия, а в 1985 г. подписывается текст Венской конвенции об его охране. Этой же цели служат Монреальский протокол 1987 г. и поправки к нему, предусматривающие контроль за озоноразрушающими соединениями, прекращение производства и использования хлорфторуглеродов.

Однако, несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований, реальные причины убыли озона до сих пор не установлены. В материалах Всемирной Метеорологической организации отмечается, что в целом прогноз состояния озонового слоя остается неопределенным, существующие химические модели не позволяют точно воспроизвести наблюдаемые вариации ОСО. Приводимые в научной литературе сведения о скорости деструкции стратосферного озона крайне противоречивы.

Возникло понимание того, что вариации озонового слоя имеют не только фотохимическую природу, а обусловлены влиянием динамических факторов в нижней стратосфере. Перенос и распределение поля озона отражает структуру и характер динамики атмосферы. Наличие системы космического мониторинга содержания озона позволяет использовать озон в качестве индикатора динамических процессов. В этой связи актуальными становятся разработка методов контроля за движением масс озона и детальное исследование пространственно-временных вариаций озонового слоя, уточнение скорости убыли ОСО, поиск дополнительных механизмов, способствующих образованию озоновых аномальных явлений (например, Антарктической озоновой дыры), и не связанных с фотохимией.

**Целью диссертационной работы** является: исследование влияния естественных факторов динамического характера на вариации глобального поля озона по спутниковым данным; анализ пространственно–временной изменчивости общего содержания озона в нижней стратосфере южного полушария; изучение долговременных трендов ОСО.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод слежения за движениями воздушных масс в нижней стратосфере, где озон выступает как пассивный атмосферный трассер, по спутниковым измерениям ОСО приборами TOMS/NIMBUS–7, TOMS/EP и OMI/AURA.
2. На основе метода исследовать зональный и меридиональный перенос масс озона в нижней стратосфере умеренных и полярных широт северного и южного полушарий.
3. Изучить влияние геофизических факторов на сезонную изменчивость пространственно-временных вариаций глобального поля озона.
4. Оценить долговременные тренды ОСО в умеренных широтах северного и южного полушарий за периоды 1978-1993 гг. и 1996-2005 гг.

#### **Научная новизна**

1. Разработан и научно обоснован новый метод атмосферного трассера, в качестве которого выступает озон в нижней стратосфере, с использованием спутниковых данных ОСО, полученных с помощью приборов TOMS/NIMBUS–7, TOMS/EP и OMI/AURA.

2. Получены оценки скорости зонального и меридионального переноса масс озона в нижней стратосфере. Впервые обнаружено, что нижняя стратосфера южного полушария вращается быстрее в 1,8 раза, чем северного.

3. Изучено влияние геофизических факторов на озон северного и южного полушарий в области умеренных широт, где формируются циркумполярные вихри. Впервые получены оценки угловых скоростей циркумполярных вихрей в обоих полушариях.

4. Исследовано взаимное влияние циркумполярного вихря (ЦВ) и Антарктической озоновой дыры. Впервые обнаружено, что существует связь дефицита массы озона в АОД и зональной скорости ЦВ с коэффициентом корреляции 0,78.

5. Найдены уточненные долговременные тренды ОСО в средних широтах северного и южного полушарий за 1978-1993 гг. и 1996-2005 гг.

**Достоверность полученных результатов** достигается применением корректных математических методов обработки спутниковой информации, обоснованностью нового метода атмосферного трассера (озона), совпадением с результатами, полученными в работах других авторов.

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

Разработан новый метод контроля движения масс озона в нижней стратосфере северного и южного полушарий на основе спутниковой информации об ОСО, полученной приборами TOMS/NIMBUS–7, TOMS/EP, OMI/AURA. Получены оценки скоростей зонального и меридионального переноса масс озона в системе общей циркуляции атмосферы.

Изучено взаимное влияние циркумполярного вихря и Антарктической озоновой дыры в нижней стратосфере южного полушария. Уточненные тренды ОСО могут стать основой для прогноза состояния озоносферы.

Работа проводилась в рамках научных исследований в ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный Университет» по госбюджетной теме «Методы и алгоритмы распознавания космических изображений земной поверхности спутниками низкого, среднего и высокого разрешения» (заказчик – Федеральное Агентство по образованию) по направлению Рациональное природопользование.

Основные результаты диссертации были использованы при создании учебно-методических комплексов: № 54–2007 «Цифровая обработка аэрокосмических изображений» и № 119–2007 «Астрономия и навигация», а также применяются в учебном процессе бакалавров и магистров направления «Геофизика» (Институт Инженерной физики и радиоэлектроники СФУ), в спецкурсах «Солнечно-земная физика», «Астрономия и навигация», «Теория обработки данных», «Проблемы глобальной геодинамики».

**Личный вклад автора.** Все представленные в работе научные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор работы принимала активное участие в создании алгоритмического и программного обеспечения работы со спутниковыми данными TOMS и OMI, в обработке данных спутниковых измерений, анализе и интерпретации полученных результатов.

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

1. Метод атмосферного трассера (озона) в нижней стратосфере на основе спутниковых данных (TOMS/NIMBUS–7, TOMS/EP, OMI/AURA), состоящий в сравнении облачной структуры поля озона за последовательные дни.
2. Результаты оценки скорости зонального и меридионального переноса озона и исследования направления его движений в нижней стратосфере.
3. Результаты исследования влияния геофизических факторов на поле озона в области умеренных широт.
4. Уточненные тренды общего содержания озона в умеренных широтах северного и южного полушарий за периоды 1978-1993 гг. и 1996-2005 гг.

**Основные результаты исследования были получены в работах по следующим проектам:** «Использование спутниковых данных для изучения пространственно–временной динамики атмосферного озона над Сибирью», (грант Минобразования РФ, 1997-1998 гг.); «Спутниковые исследования озонового слоя над Восточной Сибирью» (грант Красноярского краевого фонда науки № 6F0036, 1997 г.); «Спутниковые исследования озонового слоя над Восточной Сибирью» (грант Красноярского краевого фонда науки № 8F006, 1999 г.); «Спутниковые исследования озонового слоя над Западной и Восточной Сибирью» (грант Российского фонда образования, № 04.01.01, 2000 г.); «Создание алгоритмов комплексирования космических изображений с разным разрешением. Разработка алгоритмов для дешифрирования космических изображений и информации со спутников TERRA»

(Федеральное Агентство по образованию, 2006 г.); «Разработка параметрических и непараметрических методов обработки космических изображений земной поверхности со спутников» (Федеральное Агентство по образованию, 2007 г.); «Методы и алгоритмы распознавания космических изображений земной поверхности спутниками низкого, среднего и высокого разрешения» (Федеральное Агентство по образованию, 2008-2011 гг.).

**Апробация работы:** результаты исследований докладывались на ряде Международных и Всероссийских конференций: Международной научно-практической конференции «Спутниковые системы связи и навигации» (Красноярск, 1997); IX–XV Международной научной конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2005-2011); XII международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-12-2006)» (Тюмень, 2006); Всероссийской научной конференции «Модели и методы обработки изображений» (Красноярск, 2007); VII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (Москва, 2008); XIV, XV Всероссийском симпозиуме с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях» (Красноярск, 2008, 2010); Международной конференции «Моделирование динамических систем и исследования стабильности» (Киев 2009); XVI Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2009); Международной конференции «Современные проблемы математики, информатики и биоинформатики» (Новосибирск, 2011) и 7 других конференций (1998-2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано: 8 статей, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК и 2 статьи в других журналах; 18 работ в сборниках материалов Всероссийских и международных научных конференций и 7 работ в трудах других конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 128 страниц, включая 39 рисунков, и список литературы из 134 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи, обоснована научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору современных сведений о состоянии озонового слоя Земли и особенностях распределения озона в земной атмосфере. Рассматриваются экологическая роль атмосферного озона и проблема истощения озонового слоя. Дан краткий обзор современных аспектов фотохимического механизма образования и разрушения озона. Показана противоречивость известных оценок убыли ОСО. Приведен обзор работ об общих закономерностях глобального поля озона и особенностях его пространственно–временной изменчивости: межполушарные различия

распределения ОСО, сезонная изменчивость озона в полярных широтах, локальные аномальные области с низким содержанием озона. Рассмотрена фреонно-гетерогенная гипотеза образования АОД. Анализируются работы, посвященные влиянию геофизических факторов на глобальное поле ОСО. Кратко изложены существующие схемы движения масс озона в земной атмосфере. Обсуждается современное состояние вопроса о воздействии циркумполярных вихрей на полярный озон.

Сделан вывод, что, несмотря на тенденцию к истощению озонового слоя, причины его деградации до сих пор остаются предметом научных дискуссий. Оценки скорости убыли ОСО существенно различаются. Фотохимическая теория не объясняет особенности изменчивости глобального поля озона. Нерешенными остаются вопросы о механизмах, отвечающих за причины изменчивости глобального поля озона. Природа Антарктической озоновой дыры во многом не ясна. В целом прогноз состояния озонового слоя Земли остается неопределенным.

**Во второй главе** представлено описание приборов и методов для измерения ОСО. **В первом разделе 2 главы** изложены наземные и спутниковые методы измерения атмосферного озона. Общее содержание озона определяется из измерений ослабления солнечной УФ радиации в атмосфере на основе закона Бугера–Ламберта–Бера. В наземной аппаратуре используется дифференциальный метод, заключающийся в регистрации солнечной УФ радиации в диапазоне 290-350 нм на двух близких длинах волн (или на нескольких парах). На одной волне поглощение озоном УФ радиации небольшое, а на другой – значительное, но аэрозольное поглощение практически одинаковое. Спутниковая аппаратура измеряет ОСО методом обратно-рассеянного УФ излучения.

**Во втором разделе 2 главы** рассматриваются особенности аппаратуры TOMS и OMI, используемой в космическом мониторинге поля озона [1]. В приборе TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometers) ОСО вычисляется из разницы поглощения отраженного и рассеянного солнечного УФ излучения на 2-х парах длин волн (312,5; 331,2 нм) и (317,5; 339,8 нм). Погрешность измерений - не более 2-4%. Спектрометр OMI (Ozone Monitoring Instrument) анализирует спектр уходящей солнечной радиации в двух каналах: ультрафиолетовом (270-314 нм; 306-380 нм) и видимом (350-500 нм) с высоким пространственным разрешением. В течение суток приборами TOMS (до 2005 г.) и OMI производится глобальное картирование поля озона.

**В третьем разделе 2 главы** представлено описание спутниковых данных и методика их предварительной обработки. Ежедневные данные представлены: для TOMS на сетке с шагом по широте 1°, по долготе 1,25°, для OMI – с шагом 1° по широте и долготе [1]. Данные в глобальном масштабе охватывают всю поверхность Земли от 89,5° ю.ш. до 89,5° с.ш. и от 179,375° в.д. до 179,375° з.д..

**В четвертом разделе 2 главы** описан новый метод атмосферного трассера (озона) на основе интерпретации спутниковых данных ОСО,

полученных с помощью приборов TOMS и OMI (спутники NIMBUS-7, EARTH PROBE и AURA).

Поле ОСО в высоких и средних широтах неоднородное, имеет заметную облачную структуру, характеризующуюся ежесуточной изменчивостью. На рис. 1 в проекции Mercator приведен пример глобального поля озона за 1.07.2009 г., каждое значение ОСО имеет пространственную привязку по широте и долготе. Справа приведена шкала ОСО в е.Д. Как видно на рис. 1, в тропических широтах облачная структура менее заметна, поэтому метод работает значительно хуже.

Движение воздушных масс в нижней стратосфере исследуется по перемещению «облаков озона». Данный метод был предложен В.Б. Кашкиным [2] и развит в работах автора. В нижней стратосфере происходит сравнительно медленное разрушение молекул  $O_3$  и озон, почти в неизменном виде, перемещается вместе с воздушными массами, выступая как пассивный трассер динамических атмосферных процессов.

В настоящей работе определяется средняя скорость переноса масс озона на разных широтах северного и южного полушария в течение года. Рассмотрим подробнее практическую реализацию метода атмосферного трассера (озона) в нижней стратосфере. На рис. 2 изображен участок поля ОСО в южном полушарии за 24 сентября 2006 г. (a) и фрагмент поля ОСО за предыдущий день (23 сентября 2006 г.) (b). Фрагмент имеет вид полосы шириной  $5^\circ$ . В данном случае это полоса от  $50^\circ$  до  $55^\circ$  ю.ш.

Атмосфера вращается с запада на восток, опережая вращение Земли. Будем постепенно сдвигать фрагмент (b) «назад» (на восток), вычисляя при каждом сдвиге коэффициент взаимной корреляции  $R$  между значениями ОСО  $X_{b,n}$ , попавшими в этот фрагмент, и значениями ОСО участка поля (a)  $X_{a,n}$  в интервале ( $50^\circ$ - $55^\circ$  ю.ш.). Для вычисления коэффициента корреляции используется выражение

$$R = \frac{1}{\sigma_a \cdot \sigma_b} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_{a,n} - \bar{X}_a) \cdot (X_{b,n} - \bar{X}_b)$$

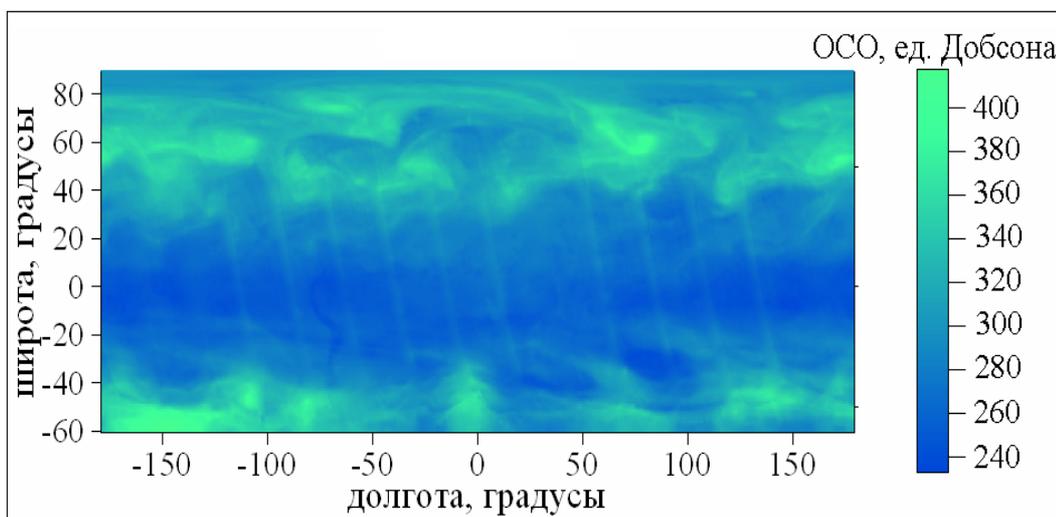


Рис. 1. Облачная структура глобального поля озона

Здесь  $\bar{X}_a, \bar{X}_b$  - средние значения ОСО в пятиградусной полосе (в нашем случае южного полушария) за выбранный  $t_a$  и предыдущий  $t_b$  дни;  $\sigma_a, \sigma_b$  - стандартные отклонения;  $N$  – число точек, в которых заданы значения ОСО. Для нашего случая поле ОСО задано на сетке ( $1^\circ \times 1^\circ$ ). В фрагменте (b) с размерами  $\varphi=5^\circ$  и длиной  $\lambda=360^\circ$  количество точек равно  $N = 1800$ .

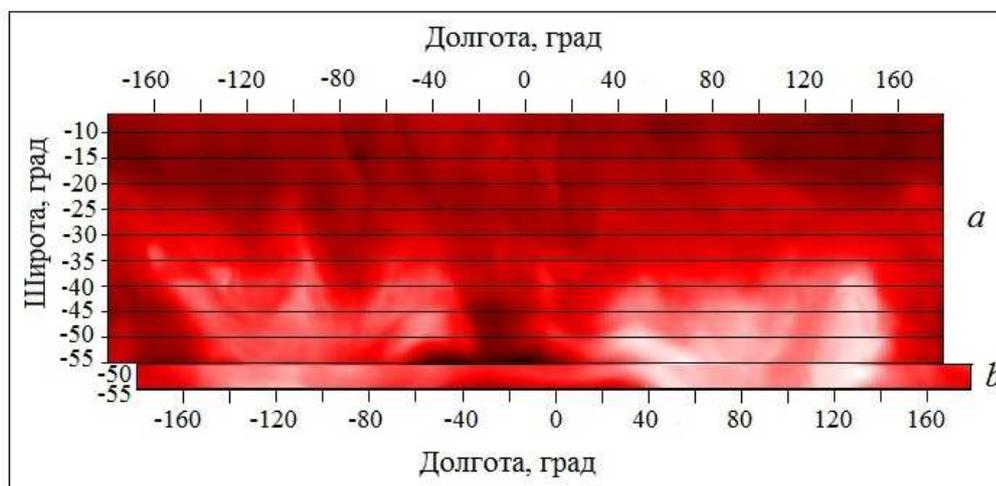


Рис. 2. Участок (a) и фрагмент (b) поля ОСО в южном полушарии

Для оценки угла поворота поля ОСО за сутки, фрагмент (b) смещается с шагом  $1^\circ$  по долготе на восток, на каждом шаге вычисляется величина  $R$ . Величина сдвига, соответствующая максимальному значению  $R$ , которое иногда достигает значений 0,95-0,98, определяет средний за сутки поворот поля. Это позволит определить скорость вращения поля ОСО относительно земной поверхности и характеризует зональное движение озона (вместе с основной массой воздуха), направление которого совпадает с направлением вращения Земли. На рис. 3 показана зависимость коэффициента корреляции  $R$  от сдвига по долготе для полосы ( $50^\circ$ - $55^\circ$  ю.ш.).

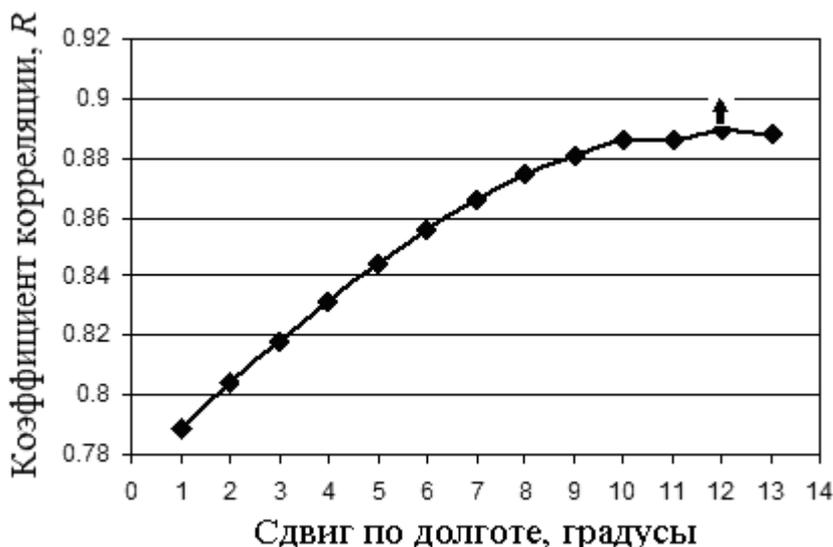


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции от сдвига по долготе

Сдвиг фрагмента (*b*) по долготе происходит до тех пор, пока вычисляемый коэффициент корреляции  $R$  не достигнет максимума. Максимальное значение  $R$  определяет сдвиг  $\Delta_1$ , соответствующий углу поворота полосы шириной  $5^\circ$  и длиной  $360^\circ$  за сутки (рис. 3). Далее фрагмент (*b*) сдвигается по широте с шагом  $1^\circ$  (стрелка на рис. 3), при каждом сдвиге снова вычисляется коэффициент корреляции  $R$ . Сдвиг прекращается, когда  $R$  достигает нового максимума, которому соответствует величина  $\Delta_2$ , характеризующая скорость (град/сут) меридионального переноса озона в направлении от экватора к полюсу (или от полюса к экватору).

Полоса  $50^\circ$ - $55^\circ$  ю.ш. (рис. 2) за сутки, с 23 по 24 сентября 2006 г., повернулась на угол  $\Delta_1=12^\circ$  и сместилась на  $\Delta_2=2^\circ$  от полюса к экватору. Коэффициент корреляции изменился от 0,7731 (без поворота и сдвига) до 0,8895 (поворот на  $12^\circ$ , без сдвига) и до 0,930 (поворот на  $12^\circ$ , меридиональный сдвиг  $2^\circ$ ). Полученные результаты согласуются с известными данными, которые свидетельствуют о том, что в нижней стратосфере меридиональная скорость воздушных масс мала, по сравнению с зональной скоростью. Коэффициент корреляции  $R$  (без сдвига) попадет в 98% доверительный интервал от 0,878 до 0,901, при наличии поворота и сдвига – в 98% доверительный интервал от 0,922 до 0,937.

Для нахождения значений зональной и меридиональной скорости разработана и используется программа «Dinamic», в которой реализован алгоритм разбиения каждого из полушарий на широтные 5-градусные зоны, оценка сдвигов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  поля ОСО в каждой полосе за сутки и формирование таблиц сдвигов в отдельные файлы. Для создания таблиц с данными расчетов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  поля ОСО за сутки в северном (южном) полушарии разработана программа «Oz\_sdvig», в которой реализована возможность формировать сводные таблицы, как за определенное количество месяцев, так и за весь год.

Таким образом, сравнивая поле ОСО за два соседних дня с помощью метода атмосферного трассера можно оценить скорость зонального и меридионального переноса масс озона, а также определить направление движения поля озона. Поскольку максимальное общее содержание озона приходится на высоты 17 км в полярных и 22 км в средних широтах, то найденные скорости озона относятся к нижней стратосфере.

**Пятый раздел 2 главы** посвящен описанию методики выделения трендов ОСО. Обычной методикой выделения тренда ОСО является использование линейной регрессионной модели, основанной на методе наименьших квадратов (МНК) [3]. Однако применение МНК к временным рядам на рис. 4 некорректно, так как МНК предполагает, что данные, не относящиеся к тренду (обычно ошибки измерений), не коррелированы.

В качестве области для исследования долгопериодной изменчивости озона был выбран диапазон широт ( $37,5^\circ$ - $57,5^\circ$ ), для которого определялось среднее значение содержания озона за день. На рис. 4 приведен пример временного ряда ОСО за 1978-1993 гг. для умеренных широт северного и южного полушарий.

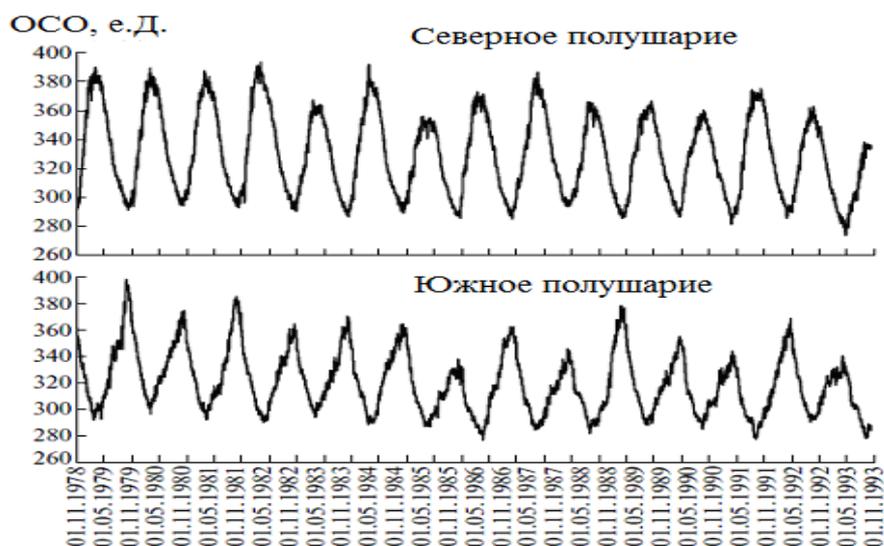


Рис. 4. Пример временного ряда средних значений ОСО в области умеренных широт за 1978-1993 гг.

Во временных рядах ОСО присутствуют квазипериодические компоненты, значения которых не только коррелированы, но и связаны функционально. Корректное выделение слабо выраженного тренда (как в нашем случае) на фоне шума и периодического сигнала большой интенсивности является сложной задачей.

При создании методики строились модельные ряды значений среднего суммарного ОСО (рис. 5). Длина ряда составила 4500 дней. Ряд ОСО содержит линейный тренд, шум и сезонный компонент в форме синусоиды с периодом в 365 дней, амплитуда которой линейно нарастает. Тренд имеет вид:  $y = a_0 + a_1x$ , где  $a_0 = 300$  е.Д.,  $a_1 = -0,001$  е.Д./день. Параметр  $a_1$  характеризует потери ОСО и соответствует уменьшению среднего ОСО на 1,21% за 10 лет. Оценка тренда ряда по МНК дает заниженное значение  $a_1 = -0,0005$  е.Д./день.

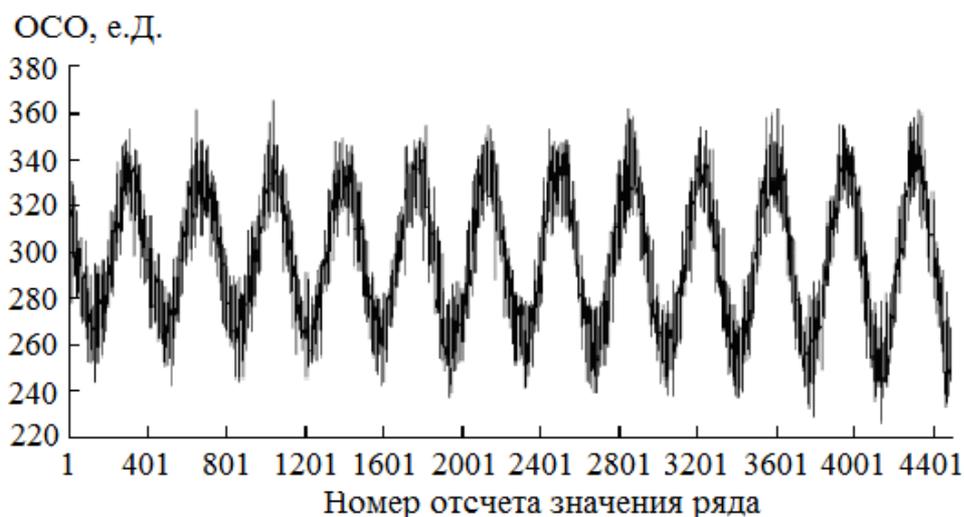


Рис. 5. Модельный ряд ОСО.

С использованием Фурье-анализа из ряда на рис. 4 был выделен квазипериодический компонент, график которого вместе с графиком исходного сезонного компонента показан на рис. 6. Видно, что метод анализа Фурье не позволяет отслеживать изменение амплитуды. Найденный сезонный компонент был вычтен из модельного ряда. Применение МНК к полученному ряду дает оценку  $a_1 = -0,00141$  е.Д./день со стандартным отклонением  $\sigma = 0,0088$  е.Д./день, значительно превышающим саму оценку. Следовательно, метод МНК не позволяет удовлетворительно оценить скорость деградации стратосферного озона.

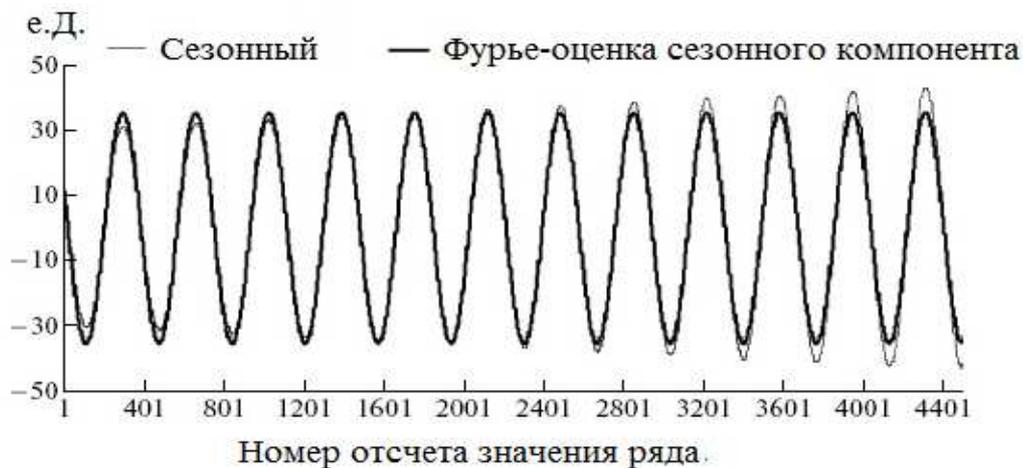


Рис. 6. Графики сезонного компонента и его Фурье-оценки.

Дальнейший анализ временных рядов ОСО проводился с помощью метода сингулярного спектрального анализа (ССА «Гусеница») [4]. Результат выделения тренда ряда ОСО (рис. 4) с помощью метода ССА показан на рис. 7. В левом нижнем углу приведен сильно искаженный начальный участок тренда (рис. 7, А), так же искажен и конечный участок. Эти концевые эффекты особенно заметны, если тренд слабо выражен (как в нашем случае).

Для повышения спектрального разрешения и устранения краевых эффектов ряды были продолжены в оба конца на 1000 дней с использованием прогноза, при этом искаженные участки сдвигаются за пределы исследуемого ряда. Тренд после устранения искажений и аппроксимирующая прямая с параметрами  $a_0 = 300,4$  е.Д.,  $a_1 = -0,00118$  е.Д./день представлен на рис. 7, Б. С помощью моделирования определено, что погрешность при оценивании  $a$  за счет краевых эффектов и шума составила всего  $\Delta a \leq 0,0001$  е.Д./сутки.

Для валидации результатов сингулярного спектрального анализа рассчитывалось стандартное отклонение величины  $a$ . Оказалось, что она не превышает  $0,0003$  е.Д./день или  $0,36\%$  за 10 лет.

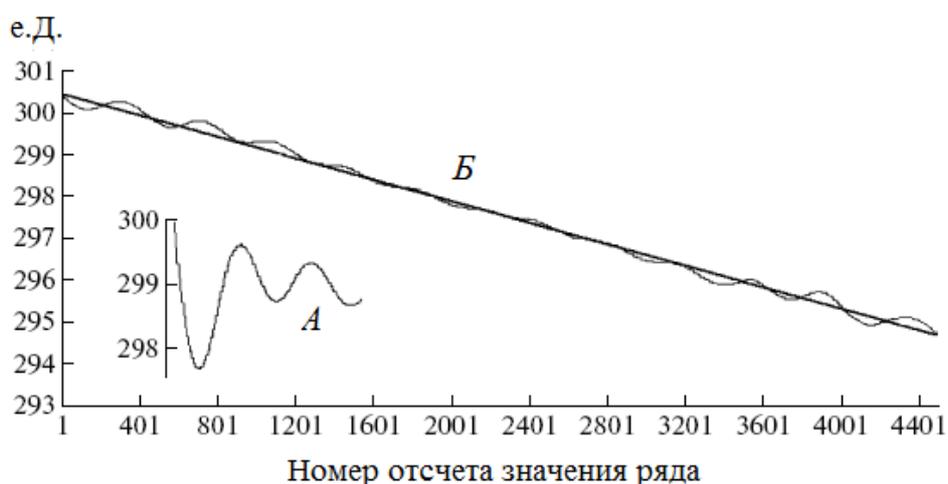


Рис. 7. Применение сингулярного спектрального анализа: *A* – искаженный начальный участок тренда, *B* – тренд после устранения искажений.

В целом применение сингулярного спектрального анализа позволило существенно увеличить достоверность оценивания тренда озона и скорости деградации озонового слоя, при этом вид тренда заранее задавать не требуется.

**В третьей главе** представлены результаты исследования: особенностей изменчивости глобального поля ОСО и движения масс озона в нижней стратосфере по спутниковым данным; влияния естественных факторов динамического характера на вариации общего содержания озона в умеренных и полярных широтах; долговременных трендов озона.

**Первый раздел 3 главы** посвящен исследованию движения масс озона в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА) на основе анализа оценок зональной и меридиональной скоростей озона. На рис. 8, *a* приведена зависимость среднегодовой зональной скорости от широты за 2000-2009 гг. Для сравнения на рис. 8, *б* показан график зональной скорости воздуха как функция широты для тропосферы на уровне 850 гПа, полученный в [5]. Из рис. 8, *б* видно, что в тропической области в тропосфере происходит субротация – более медленное вращение, чем вращение Земли вокруг оси. В настоящей работе зональное движение масс озона в тропических широтах нижней стратосферы не изучалось. В умеренных и полярных широтах и тропосфера, и нижняя стратосфера в целом опережают вращение Земли – наблюдается суперротация атмосферы. Обнаружено, что в течение года поле ОСО в нижней стратосфере южного полушария вращается быстрее поля северного в 1,8 раза. Максимальные значения зональной скорости  $u(O_3)$  в нижней стратосфере асимметричны относительно экватора и наблюдаются на широтах  $40^\circ$  с.ш. и  $50^\circ$  ю.ш., совпадая с широтами максимумов  $u(850 \text{ гПа})$  для тропосферы. Для нижней стратосферы максимумы скоростей  $u(O_3)$  составляют 5,17 м/с (в северном) и 8,75 м/с (в южном).

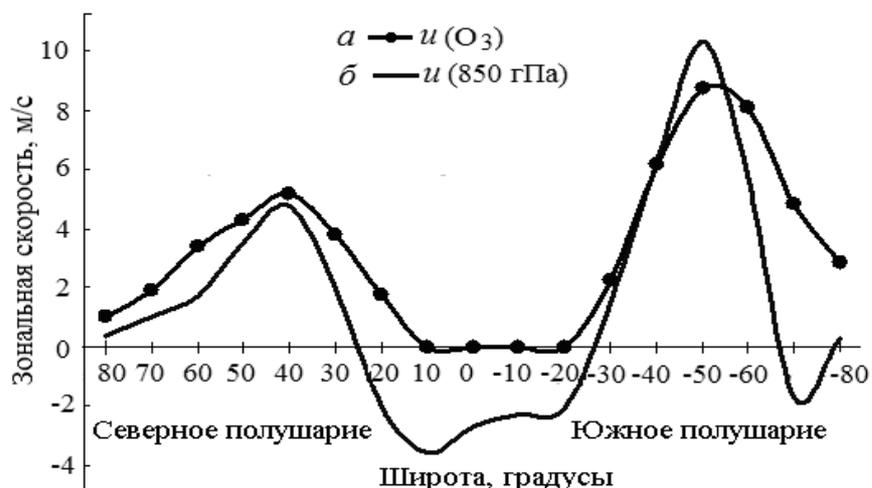


Рис.8. Зависимость зональной скорости от широты за период 2000-2009 гг. в нижней стратосфере (а), в тропосфере на уровне 850 гПа (б)

Во втором разделе 3 главы изучено влияние планетарного геофизического фактора – орбитального движения Земли вокруг Солнца в 1997-2005 гг. на изменчивость поля ОСО в умеренных широтах, где происходит формирование циркумполярных вихрей (ЦВ). С помощью метода атмосферного трассера (озона) оценены угловые скорости вращения ЦВ  $w_{СП}$  в северном и  $w_{ЮП}$  в южном полушарии. В течение года сменяют друг друга два режима вращения ЦВ неравной продолжительности: в северном полушарии 5 месяцев происходит замедление и 7 – ускорение, а в южном – 7 месяцев замедление и 5 ускорение.

На рис. 9 показаны вариации орбитальной скорости Земли  $v(\theta)$  и угловых скоростей циркумполярных вихрей  $w_{СП}$  в северном и  $w_{ЮП}$  в южном полушарии. Коэффициент корреляции между рядами значений  $w_{СП}$  и  $v(\theta)$  статистически значим и равен +0,97, коэффициент корреляции между  $w_{ЮП}$  и  $v(\theta)$  также значим, и составляет -0,93.

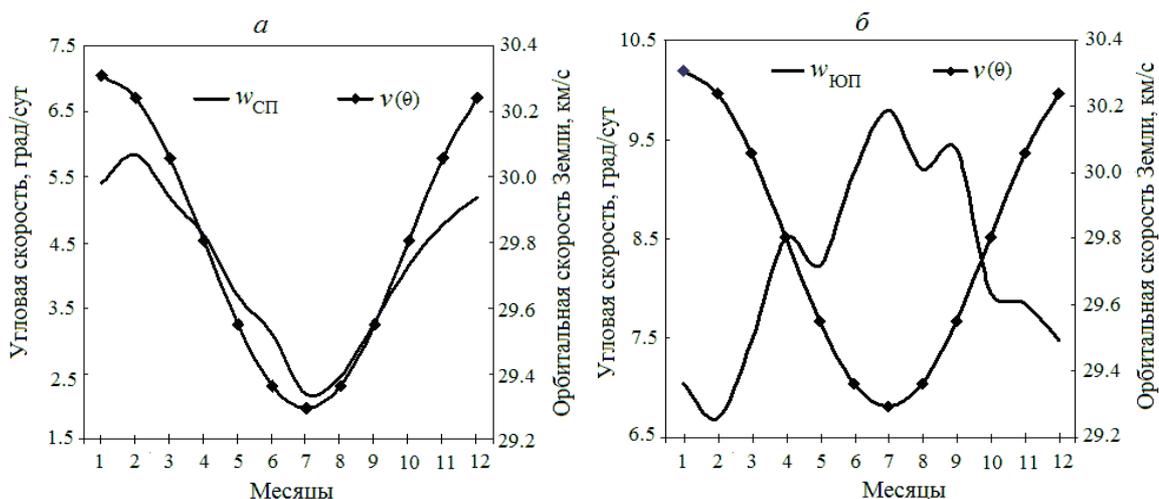


Рис. 9. Изменение в течение года орбитальной скорости Земли  $v(\theta)$  и угловых скоростей циркумполярных вихрей  $w_{СП}$  (а) и  $w_{ЮП}$  (б)

Анализ экстремальных значений  $v(\theta)$ ,  $w_{СП}$  и  $w_{ЮП}$  выявил, что минимумы величин  $v(\theta)$  и  $w_{СП}$  наблюдаются в июле (рис. 9, а). Максимальные значения  $v(\theta)$  и  $w_{СП}$  наблюдаются с временным сдвигом в один месяц (в январе и феврале, соответственно) (рис. 9, а). По-видимому, изменение угловой скорости циркумполярных вихрей северного и южного полушария определяется ускорением и замедлением орбитального движения Земли. Обнаружено, что увеличение орбитальной скорости Земли приводит к уменьшению угловой скорости циркумполярного вихря в южном полушарии.

Проведено сравнение среднемесячных значений угловых скоростей вращения циркумполярных вихрей за периоды 1979-1981 гг. и 1997-2005 гг. (рис. 10 и 11).



Рис. 10. Годовые вариации угловой скорости циркумполярного вихря в северном полушарии

Максимальное значение угловой скорости ЦВ на рис. 10 в северном полушарии в зимне-весенний период 1979-1981 гг. составило 5,5 град/сут, в этот же период в 1997-2005 гг. оно несколько увеличилось – до 5,9 град/сут. В 1979-1981 гг. минимальное значение было равным 1,9 град/сут, в 1997-2005 гг. оно составило 2,2 град/сут. Наблюдается временной сдвиг в один месяц для экстремальных значений угловых скоростей ЦВ: по сравнению с периодом 1979-1981 гг., в период 1997-2005 гг. максимум сместился с марта на февраль, а минимум – с августа на июль.

На рис. 11 показаны вариации угловых скоростей ЦВ в южном полушарии. В 1979-1981 гг. минимальная скорость составила в декабре 6,1 град/сут. В 1997-2005 гг. минимум скорости наблюдался в феврале и был равен 6,7 град/сут. Максимумы угловых скоростей наблюдались: для периода 1979-1981 гг. в августе (9,5 град/сут), для периода 1997-2005 гг. в июле (9,8 град/сут.). В южном полушарии изменились характер вращения циркумполярного вихря: период «замедления» увеличился с 4 месяцев (в 1979-1981 гг.) до 7 (в 1997-2005 гг.), а период «ускорения» уменьшился с 8 месяцев (в 1979-1981 гг.) до 5 (в 1997-2005 гг.).



Рис. 11. Годовые вариации угловой скорости циркумполярного вихря в южном полушарии

**Третий раздел 3 главы** посвящен исследованию Антарктической озоновой дыры в весенний период, когда происходит перестройка в системе ОЦА. На рис. 12, *а* показан пример *3d* изображения АОД за 29 сентября 2010 г., построенное по данным прибора OMI/Aura. Широтная область формирования озоновой дыры ( $70^{\circ}$ - $90^{\circ}$  ю.ш.). Минимальное значение ОСО в АОД равно 124 е.Д.. Показано, что озоновую дыру в средних широтах окружает циркумполярный вихрь – область с аномально высоким (для южного полушария) общим содержанием озона (до 445 е.Д.) (рис. 12, *б*). Анализ с помощью метода атмосферного трассера показал, что в течение нескольких последовательных суток основное изменение озоновой аномалии связано с ее поворотом вокруг полюса и смещением в меридиональном направлении.

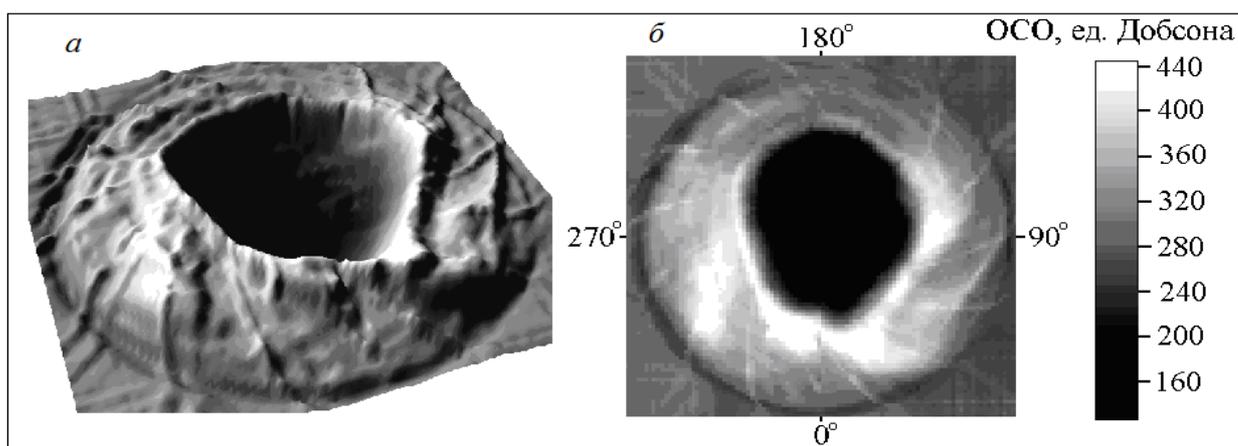


Рис. 12. *а* – *3d* изображение озонового слоя в Южном полушарии за 29 сентября 2010 г., *б* – *2d* изображения за 29 сентября 2010 г.

Установлено, что во время формирования циркумполярного вихря и Антарктической озоновой дыры происходит отток масс озона из полярной

области в средние широты (визуализация участка озонового слоя за 1 и 2 сентября 2006 г. представлена на рис. 13).

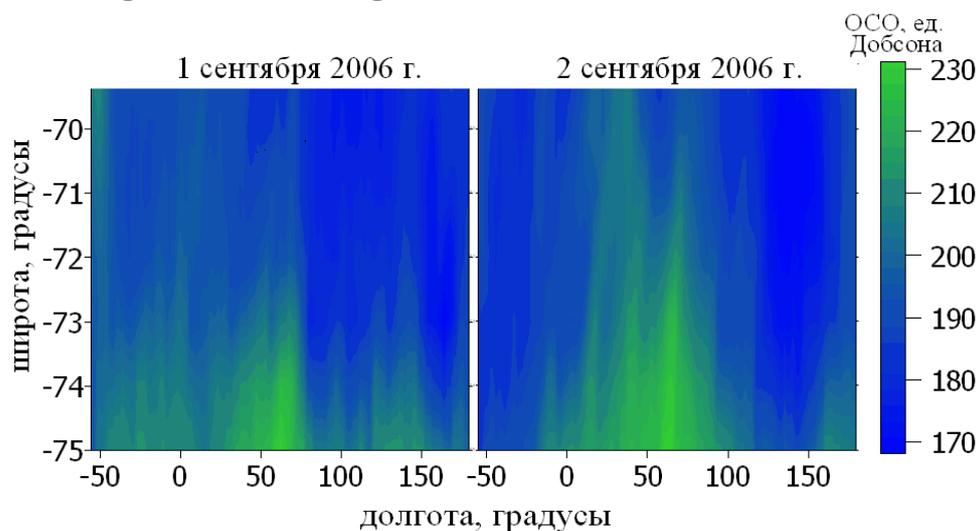


Рис. 13 . Визуализация участка озонового слоя в южном полушарии за 1 и 2 сентября 2006 г.

В октябре и ноябре наблюдается приток озона в область АОД, пример процессов движения масс озона в полярные широты за 9 и 10 октября 2006 г. приведен на рис. 14.

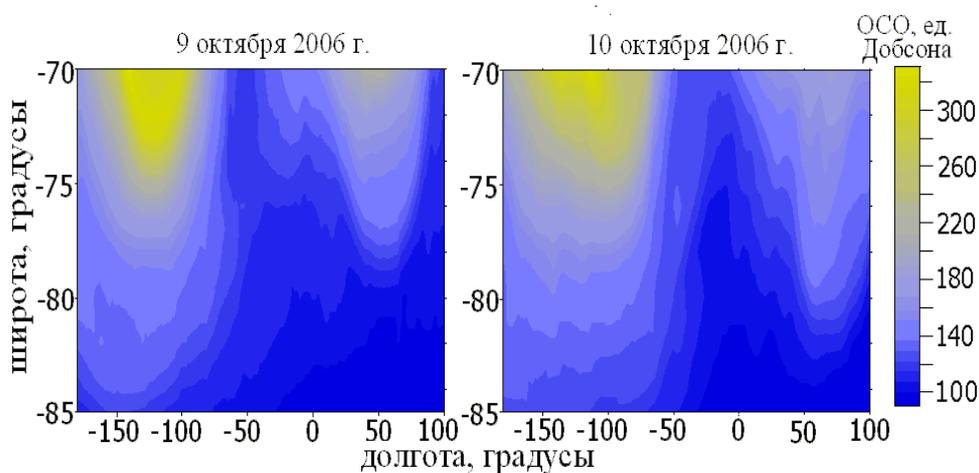


Рис. 14 . Визуализация участка озонового слоя в южном полушарии за 9 и 10 октября 2006 г.

Из результатов меридионального движения озона в 1997-2008 гг. было обнаружено, что меридиональная скорость, с которой озон выносится из АОД, достигает 1,5 град/сутки (рис. 15). Для сравнения на рис. 15 приведен профиль ОСО в южном полушарии для весны 2006 г. Увеличение общего содержания озона до 360 е.Д. произошло в широтной зоне ( $45,5^{\circ}$ - $50,5^{\circ}$  ю.ш.).

Анализ значений общего содержания озона показал, что в период 1997-2010 гг. (в сентябре) область накопления озона (область максимального ОСО) в циркумполярном вихре варьировалась в пределах ( $45,5^{\circ}$ - $55,5^{\circ}$  ю.ш.) в разные годы. Период с 1 сентября по 31 октября характеризуется наибольшей динамической активностью в южной полярной стратосфере.



Рис. 15. Зависимость скорости меридионального переноса озона (за 1997-2008 гг.) от широты и ОСО в южном полушарии (сентябрь 2006 г.)

На рис. 16 показана временная зависимость скорости меридионального переноса для АОД в широтной зоне ( $70^{\circ}$ - $75^{\circ}$  ю.ш.). Положительным значениям скорости соответствует отток масс озона в сторону циркумполярного вихря, отрицательным – приток озона из средних широт в область озоновой дыры. График на рис. 16 описывается нерегулярной кривой. Происходят переносы масс озона в обоих направлениях. Однако к моменту максимума глубины дыры (28-30 сентября) преобладает отток (среднее значение скорости за сентябрь 0,33 град/сутки), далее начинается приток (среднее за октябрь -1,22 град/сутки). Нерегулярный характер кривой объясняется тем, что полученные данные относятся ко всей области дыры, на ее периферии происходят процессы оттока и притока масс озона, а вместе с этим имеет место смена знаков меридиональной составляющей скорости озона. Следовательно, говорить о полной изоляции циркумполярным вихрем нижней стратосферы над Антарктидой во время существования озоновой дыры нельзя.

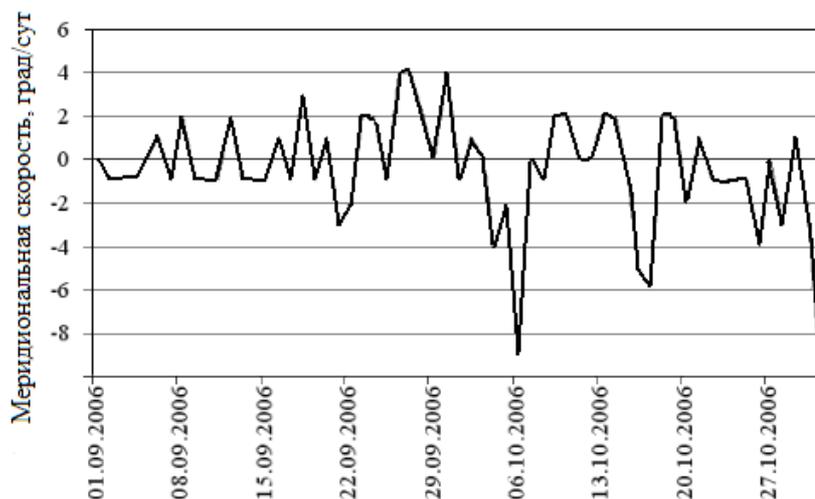


Рис. 16. Зависимость скорости меридионального переноса от времени

Приведены результаты расчетов площади озоновой дыры для области, внутри которой  $ОСО < 220$  е.Д., и дефицита массы озона в стратосфере  $О_3MD$  в широтной области вокруг южного полюса, характеризующего уменьшение количества озона в пределах АОД. Анализ движения масс озона в весенний период 1986-2010 гг. позволил выделить до дня минимума ОСО период в 8-12 дней, когда возникают наибольшие вариации зональной скорости масс озона: в первые 8-9 дней  $w_{зон}$  возрастает, а в последующие 1-3 дня  $w_{зон}$  уменьшается. Рассчитывалась средняя зональная скорость  $w_{зон}$  в области накопления ОСО циркумполярного вихря за первые 8-9 дней. На рис. 17 приведены значения  $w_{зон}$ . Здесь же показан дефицит массы озона ( $О_3MD$ ), вычисленный для дат минимума ОСО исследуемого периода. Между значениями  $w_{зон}$  и  $О_3MD$  существует тесная зависимость, коэффициент корреляции составляет 0,78. Можно утверждать, что изменение количества озона в АОД связано с динамическими процессами в нижней стратосфере.

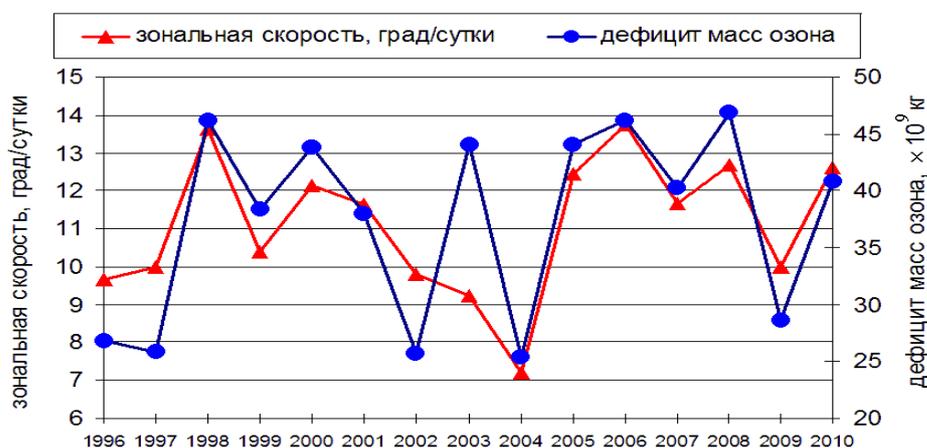


Рис. 17. Изменение зональной скорости в области накопления ОСО в ЦВ и дефицита массы озона в Антарктической озоновой дыре

Полученные экспериментальные данные могут лечь в основу новой теории образования и исчезновения Антарктической озоновой дыры.

**В четвертом разделе 3 главы** приведены результаты исследования временных рядов ОСО с помощью метода сингулярного спектрального анализа. Для исследования выбрана широтная область ( $37,5^\circ$ - $57,5^\circ$ ) северного и южного полушарий, для которой рассчитывалось среднее ОСО за день (рис. 4). Длина исходного временного ряда ОСО составила  $n=5174$  отсчета (дней) для 1978-1993 гг. и  $n=3446$  отсчетов (дней) для 1996-2005 гг..

Были выделены тренды среднего ОСО для двух исследуемых периодов, которые приведены на рис. 18 (а, б). Тренды допускают линейную аппроксимацию. Для периода 1978-1993 гг. установлено, что в умеренных широтах северного полушария оценка скорости деградации озона  $a = -0,0029$  е.Д./сутки, стандартное отклонение оценки  $\sigma_a=0,0001$  е.Д./сутки. В умеренных широтах южного полушария оценка этого параметра составила  $a = -0,0034$  е.Д./сутки, стандартное отклонение оценки  $\sigma_a=0,0002$  е.Д./сутки.

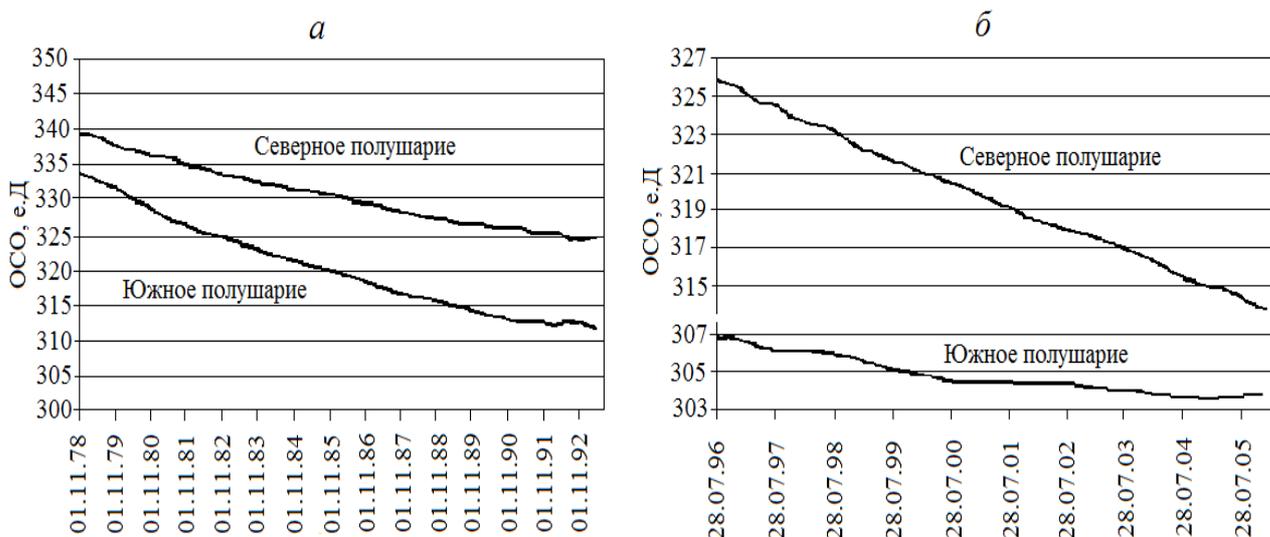


Рис. 18. Тренды временных рядов ОСО в кольце ( $37,5^{\circ}$ - $57,5^{\circ}$ ) за 1978-1993 гг. (а) и 1996-2005 гг. (б)

Оценка скорости изменения ОСО в умеренных широтах северного полушария в 1996-2005 гг. составила  $a = -0,0017$  е.Д./сутки, стандартное отклонение  $\sigma_a = 0,0001$  е.Д./сутки. Оценка скорости изменения ОСО в умеренных широтах южного полушария составила  $a = -0,0021$  е.Д./сутки, стандартное отклонение оценки  $\sigma_a = 0,0001$  е.Д./сутки.

Анализ полученных трендов ОСО для периода 1978-1993 гг. показал, что в средних широтах северного полушария до введения запрета на озоноразрушающие вещества Монреальским протоколом озоновый слой истощался на 3,4% за 10 лет, а в южном – на 4,8% за 10 лет (рис. 18, а). По литературным данным уменьшение ОСО составило от 3 до 7% [6]. Уменьшение общего содержания озона в северном полушарии в 1996-2005 гг. происходило со скоростью 2,9% за 10 лет, а в южном – 1,0% за десятилетие (рис. 18, б).

### В заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработан новый метод атмосферного трассера (озона) в нижней стратосфере на основе спутниковой информации об ОСО.
2. Получены оценки скорости зонального и меридионального переноса озона и исследовано его движение в нижней стратосфере. Обнаружено, что в течение года нижняя стратосфера южного полушария вращается быстрее, чем северного, в 1,8 раза.
3. Изучено влияние геофизических факторов на озон северного и южного полушарий в области умеренных широт, где формируются циркумполярные вихри. Оценены значения угловых скоростей циркумполярных вихрей и выявлены временные особенности ЦВ в (1979-1981 гг.) и (1997-2005 гг.).
4. Обнаружено, что полная изоляция циркумполярным вихрем нижней стратосферы над Антарктидой во время существования АОД отсутствует. Установлено, что в сентябре озон «утекает» из области АОД со скоростью до 1,5 град/сутки.

5. Исследовано взаимное влияние циркумполярного вихря (ЦВ) и Антарктической озоновой дыры в южном полушарии в 1996-2010 гг. Обнаружено, что существует тесная связь дефицита массы озона в АОД с зональной скоростью области накопления ОСО в ЦВ, коэффициент корреляции 0,78.
6. Уточнены долговременные тренды изменчивости общего содержания озона в средних широтах северного и южного полушарий за периоды 1978-1993 гг. и 1996-2005 гг.

### **Список цитированной литературы**

1. База данных NASA: <http://toms.gsfc.nasa.gov>
2. Kashkin V.B., Khlebopros R.G., Kolyada M.N. Satellite total ozone as an indicator of stratospheric dynamics: a new interpretation of ozone holes / Paris: Institut des Hautes Etudes Scientifiques: IHES/M/02/02, 2002. – 18 p.
3. Varotsos C. Atmospheric pollution and remote sensing: implications for the southern hemisphere ozone hole split in 2002 and the northern mid\_latitude ozone trend // *Advances in Space Research*. – 2004. – V. 33. – Issue 3. – P. 249–253.
4. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» SSA: анализ временных рядов. – СПб: СПб ун-т, 2004. – 74 с.
5. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. – М.: Физматлит, 2002. – 382 с.
6. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998 (World Meteorological Organisation Global Ozone Research and Monitoring Project, rep. 44). WMO. Geneva, 1999.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Специализированный практикум по обработке изображений для студентов младших курсов // *Физическое образование в Вузах*. – Т. 4. – № 1. – 1998. – С. 100–104.
2. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Применение сингулярного спектрального анализа для выделения слабо выраженных трендов // *Известия Томского политехнического университета*. – Т. 311. – № 5. – 2007. – С.116–119.
3. Границкий Л.В., Рублева Т.В., Фрейдман А.Л. Моделирование движение спутника в топоцентрической системе координат // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета*. – 2008. – Вып. 1 (18). – С. 119–123.
4. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Природоохранная геофизика: проблемы озонового щита планеты // *Инженерная экология*. – № 4. – 2009. – С. 18– 33.
5. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // *Исследование Земли из космоса*. – 2009. – № 4. – С. 9–16.
6. Рублева Т.В., Кашкин В.Б., Мясников В.М., Селиверстов С.А. Изменчивость полярного стратосферного озона южного полушария по спутниковым данным (аппаратура TOMS, OMI) // *Вестник Сибирского*

государственного аэрокосмического университета. – 2011. – Вып. 2 (35). – С. 58–62.

7. Тесленко В.И., Заварзина Н.И., Кашкина Л.В., **Рублева Т.В.**, Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Изучение глобальных экологических проблем на основе интеграции фундаментальной науки и образования. // Преподаватель. – № 4. – 2000. – С. 56–63.

8. Кашкин В.Б., Кашкина Л.В., **Рублева Т.В.** Атмосферный озон и его изучение с помощью наземной и спутниковой аппаратуры // Современное образование. – № 3. – 2001. – С. 63–71.

9. Кашкин В.Б., Сухинин А.И., Ромасько В.Ю., **Рублева Т.В.** Спутниковые исследования состояния озонового слоя // Труды Международной научно-практической конференции «Спутниковые системы связи и навигации». – Красноярск: КГТУ, 1997. – С. 122–125.

10. Макевич П.С., Кашкин В.Б., Мясников В.М., **Рублева Т.В.** Определение вертикального распределения концентрации озона по спутниковым данным // Материалы 1X Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск, 2005. – С. 258–259.

11. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.**, Корнеев А.М. Исследование динамики Антарктической озоновой «дыры» // Доклады 12 международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-12 – 2006)». – Тюмень, 2006. – С.71–76.

12. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.**, Павлова О.А. Межгодовые вариации озонового слоя над Красноярском // Материалы X Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск: СибГАУ, 2006. – С.111–112.

13. Кашкин В.Б., Игнаткин В.В., **Рублева Т.В.**, Григорьев А.С. Анализ пространственных вариаций озонового слоя в Южном полушарии по данным спутника // Материалы Всероссийской научной конференции «Модели и методы обработки изображений (ММОИ-2007)». – Красноярск: СФУ, 2007. – С. 43–45.

14. Степанова А. П., Кашкин В. Б., **Рублева Т. В.** Исследование трендов ОСО в Северном и Южном полушариях по спутниковым данным // Материалы XI Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск: СибГАУ, 2007. – С. 99.

15. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Исследование озонового слоя Земли по спутниковым данным // Труды VII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. – С. 544–557.

16. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Особенности формирования и развития Весенней озоновой аномалии в Антарктиде // Тезисы докладов XIV Всероссийского симпозиума «Сложные системы в экстремальных условиях». – Красноярск: КНЦ СО РАН, 2008. – С. 25–26.

17. Кашкин В.Б., Носова Е.И., **Рублева Т.В.** Влияние циркумполярного вихря на озоновый слой в Южном полушарии // Материалы XII

- Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск: СибГАУ, 2008. – С. 34–36.
18. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Исследование трендов общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Материалы XIV Всероссийского симпозиума «Сложные системы в экстремальных условиях». – Красноярск: КНЦ СО РАН, 2009. – С.13–23.
19. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.**, Хлебопрос Р.Г. Новый подход к исследованию озонового слоя // Материалы Международной конференции «Моделирование динамических систем и исследования стабильности». – Киев, 2009. – С. 213.
20. Анишин А.В., Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Вариации общего содержания озона в Южном полушарии // Материалы XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск: СибГАУ, 2009. – С.177.
21. Кашкин В.Б., Носова Е.И., **Рублева Т.В.** Зональный и меридиональный перенос озона в стратосфере // Материалы XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск: СибГАУ, 2009. – С. 182–183.
22. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Исследование динамики озонового слоя по спутниковым данным // Материалы XVI Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. – С. 711–714.
23. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.** Глобальная изменчивость поля общего содержания озона / Материалы XV Всероссийского симпозиума с международным участием: «Сложные системы в экстремальных условиях», 16-21 августа 2010 г. – Красноярск: КНЦ СО РАН. – 2010. – С. 36–37.
24. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.**, Осипов А.В., Селиверстов С.А. Феномен изменчивости озонового слоя в полярной области / Материалы XIV Международной конференции «Решетневские чтения», 10-12 ноября 2010, Красноярск. – Ч.1. – С. 194–195.
25. Кашкин В.Б., Хлебопрос Р.Г., **Рублева Т.В.** Озоновый щит Земли: легенды и реалии. Аэродинамическая модель Антарктической озоновой дыры / Материалы Международной конференции «Современные проблемы математики, информатики и биоинформатики», посвященная 100-летию А.А.Ляпунова 11 - 14 октября 2011 г., г. Новосибирск. – Электронный ресурс <http://conf.nsc.ru/files/conferences/Lyap-100/fulltext/84146/85657/>
26. Кашкин В.Б., **Рублева Т.В.**, Мясников В.М., Селиверстов С.А. Особенности полярного озона в нижней стратосфере южного полушария/ Материалы XV Международной конференции «Решетневские чтения» 10-12 ноября 2011, г. Красноярск. – Ч.1. – С. 203–204.