

Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова
физический факультет

На правах рукописи

Жадин Евгений Александрович

УДК 550.385;523.62

**Влияние межгодовых вариаций температуры
поверхности океана на циркуляцию стратосферы и
озоновый слой**

25.0029 физика атмосферы и гидросферы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
физико - математических наук

Москва 2004

Работа выполнена в ГУ Центральная Аэрологическая Обсерватория

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	Ларин И.К.
доктор физико-математических наук, профессор	Гулев С.К.
доктор физико математических наук	Володин Е.М.

Ведущая организация: Гидрометеоцентр России

Защита состоится < 19 > < февраля > 2004 года в < 15.30 > часов на заседании диссертационного совета по геофизике Д 501.001.63 в Московском Государственном Университете, физический факультет по адресу: 119992, Москва, Воробьевы горы, ГСП-2, аудитория ЮФА

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан < 16 > < декабря > 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.63

кандидат физико-математических наук	В.Б.Смирнов
-------------------------------------	-------------

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность работы

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических исследований, причины уменьшения озонового слоя и изменений климата Земли до сих пор неизвестны. Если в 1980-1990 - х годах большинство ученых были полностью уверены в антропогенной природе наблюдаемого истощения озонового слоя из-за роста эмиссии в атмосферу антропогенных озоноразрушающих веществ, то в последние годы появились убедительные доказательства большой роли естественных факторов, связанных с долгопериодными вариациями в системе океан-атмосфера, которые сильно изменили динамические процессы переноса и температурный режим стратосферы в течение двух последних десятилетий, создав благоприятные термодинамические условия для химических механизмов разрушения озонового слоя. Таким образом, главным вопросом современного состояния проблемы изменения озонового слоя и климата является разработка физических механизмов, ответственных за естественные долгопериодные изменения в системе океан - атмосфера - озоновый слой и оценки относительной роли антропогенных и естественных факторов в наблюдаемых изменениях озонового слоя.

Актуальность решения этого вопроса состоит также в том, что модельные предсказания эволюции озонового слоя, на которых основан Монреальский Протокол по защите озонового слоя, не учитывают влияния долгопериодных изменений динамики атмосферы на озоновый слой, поэтому степень ограничений производства фреонов и галонов может быть уточнена, что имеет большое практическое значение для промышленности России. Исследование связей межгодовых и долгопериодных изменений озона и климата является актуальным также с точки зрения разработки новых методов сверхдолгосрочных прогнозов резких климатических изменений, которые наблюдаются в последние годы.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование и разработка механизма влияния межгодовых вариаций температуры поверхности океана (ТПО) на циркуляцию стратосферы и озоновый слой для оценки относительного воздействия антропогенных и естественных факторов на изменения атмосферного озона.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы были проведены следующие исследования:

- проведены численные модельные эксперименты с целью разработки физического механизма влияния изменений ТПО на волновую активность стратосферы и вихревой перенос озона,
- с помощью современных математических методов и использованием банков данных наблюдений проведен анализ связей межгодовых аномалий ТПО, стратосферной циркуляции и общего содержания озона в глобальном масштабе для подтверждения реальности разработанного физического механизма,
- исследованы связи основных мод изменений климата Северного и Южного полушарий (Арктической и Антарктической Осцилляций) с аномалиями ТПО Тихого, Атлантического и Индийского океанов,
- предложены эмпирические оценки относительной роли долгопериодных изменений динамических процессов в наблюдаемых трендах содержания озона.

Научная новизна

- Разработано новое направление в исследованиях озонового слоя – влияние межгодовых и долгопериодных аномалий температуры поверхности Мирового океана внетропических широт на изменения озонового слоя.
- Впервые разработан простой физический механизм волновой гипотезы воздействия аномалий ТПО на изменения стратосферной

циркуляции и озоновый слой, который основан на интерференции орографического и термического источников стационарных планетарных волн.

- На основе анализа данных содержания озона и циркуляции стратосферы впервые показано, что в начале 1980 - х годов произошел резкий переход динамики стратосферы средних широт к новому долгопериодному режиму, который в последующие годы привел к сильной изолированности стратосферных вихрей Антарктики и Арктики. Обнаружены сильные корреляции межгодовых изменений стратосферной циркуляции и содержания озона, включая эволюцию озоновой дыры в Антарктике.

- Впервые показано, что межгодовые изменения содержания озона в средних и высоких широтах Северного полушария, а также вариации динамики стратосферного вихря Арктики сильно связаны с разностью аномалий ТПО северной части Тихого океана (центр действия южнее Алеутских островов) и Атлантики (центр действия вблизи Ньюфаундленда) - в диполе аномалий ТПО через Скалистые горы. Эволюция озоновой дыры в Антарктике и динамики стратосферы средних широт Южного полушария также тесно связаны с аномалиями ТПО южной части Тихого и Атлантического океанов в диполе через Анды и аномалиями ТПО южной Атлантики и Индийского океана в диполе через Африку.

- Обнаружены сильные связи аномалий ТПО в диполе через Скалистые горы с Арктической Осцилляцией. Это означает, что причиной Арктической Осцилляции может быть внешнее возбуждение изменений волновой активности атмосферы аномалиями ТПО вполне определенной структуры в соответствии с механизмом волновой гипотезы

- Эмпирические оценки показали, что относительный вклад "антропогенных" факторов в наблюдаемые тренды озона не превышает 50%.

Научная и практическая ценность

Разработанный физический механизм и результаты анализа данных наблюдений свидетельствуют о большой роли аномалий температуры поверхности Мирового океана вполне определенной структуры в межгодовых и долгопериодных изменениях стратосферной циркуляции и озонового слоя в глобальном масштабе.

Тот же самый механизм может быть ответственен за основные моды изменений климата - Арктической и Антарктической Осцилляций.

Результаты работы могут быть использованы в моделях общей циркуляции атмосферы и океана для оценок относительной роли антропогенных и естественных факторов в изменениях озонового слоя и климата Земли.

Практическое значение полученных результатов состоит в необходимости уточнения Монреальского Протокола, что является важным для промышленности России. Кроме того, результаты данной работы могут быть основой для разработки нового метода прогноза экстремальных погодных условий (например, холодных зим на территории России) по данным измерений общего содержания озона.

Положения, выносимые на защиту

- Механизм волновой гипотезы объяснения влияния внетропических аномалий ТПО на изменения волновой активности и циркуляцию стратосферы и озонового слоя.
- Результаты анализа связей межгодовых вариаций ТПО, циркуляции стратосферы и содержания озона, подтверждающие реальность механизма волновой гипотезы.
- Доказательства большой роли межгодовых вариаций ТПО в диполе через Скалистые горы в Северном полушарии и диполях через Анды и Африку в Южном полушарии в наблюдаемом уменьшении озона, а также внешнего возбуждения Арктической и Антарктической Осцилляций.
- Эмпирические оценки относительной роли изменений динамики стратосферы в трендах озонового слоя.

Достоверность полученных результатов

Механизм волновой гипотезы, предложенный в данной работе, имеет простой и ясный физический смысл. Данные наблюдений межгодовых вариаций ТПО, циркуляции стратосферы и общего содержания озона получены независимыми методами и их точность неоднократно проверялась.

Сравнение рассчитанных изменений атмосферного момента импульса с вариациями скорости вращения Земли, которые измеряются с огромной точностью, также свидетельствует о достоверности используемых данных. Математический аппарат,

примененный для анализа данных, широко используется в физике атмосферы и океана и других областях знаний в последние годы.

Личный вклад

Основные результаты работы были получены автором диссертации.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на многочисленных международных конференциях, в том числе международном совещании по подготовке международного отчета по оценкам озонового слоя, Швейцария, 1991; симпозиуме по исследованиям средней атмосферы (IAMAS), Киото, Япония, 1992; семинарах в Метеорологическом исследовательском институте, Цукуба, Япония, 1994; международном симпозиуме по солнечно-земной физике, Сендай, Япония, 1994; международных совещаниях по воздействию стратосферной авиации на озоновый слой, Вирджиния Бич, США, 1995 и 1998; международных симпозиумах по химии атмосферы (IGAC), Нагоя, Япония, 1997 и Болонья, Италия, 1999; конференции IAMAS, Инсбрук, Австрия, 2001.

В России результаты докладывались на семинарах в Центральной Аэрологической Обсерватории, Институте Прикладной Геофизики, Московском Государственном Университете, Институте Физики Атмосферы, Институте Вычислительной Математики РАН.

Общее число опубликованных статей 48, в том числе по теме диссертации - 41.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения, изложенных на 208 страницах машинописного текста, в том числе 65 рисунков и 2 таблицы, в списке цитируемой литературы 112 наименований.

Краткое содержание диссертации

В первой главе диссертации изложена общая характеристика диссертационной работы, приведенная выше.

В **главе 2** (введении) дано описание проблемы воздействия естественных и антропогенных факторов на уменьшение озонового слоя. Приведен краткий обзор известных химических механизмов разрушения озонового слоя, а также дальних связей тропосферной динамики и долгопериодных изменений параметров тропосферы. Сформулированы основные вопросы, касающиеся воздействия межгодовых и долгопериодных изменений температуры поверхности океана на термическое возбуждение стационарных планетарных волн, волновую активность, циркуляцию стратосферы и озоновый слой.

В **главе 3** представлен механизм волновой гипотезы влияния аномалий ТПО на вариации атмосферной волновой активности и состав озонового слоя, основанный на результатах численных экспериментов с моделью стационарных планетарных волн и циркуляции стратосферы [1]. Результаты этих экспериментов показали, что стратосферная циркуляция и вихревой перенос озона планетарными волнами слабо реагирует на изменения амплитуды температуры поверхности океана. Однако, в модели наблюдается сильная реакция этих параметров зимней стратосферы к изменениям географического расположения экстремумов аномалий ТПО в Тихом и Атлантическом океанах. Несмотря на очевидные недостатки механистической модели планетарных волн, эти модельные исследования позволили сформулировать физически ясный механизм влияния внетропических аномалий ТПО на атмосферную волновую активность и естественные изменения состава озонового слоя.

Источниками стационарных планетарных волн, проникающих из тропосферы в стратосферу в зимний период, являются орография (Скалистые горы, Тибет в Северном полушарии и Анды в Южном полушарии) и термическое возбуждение, связанное с контрастами температуры материков и океанов. Межгодовые и долгопериодные аномалии ТПО изменяют термический источник планетарных волн, вклад которого сравним с орографическим источником. Интерференция изменяющегося от года к году термического источника и постоянного во времени орографического источника сильно зависит от разности фаз (географического расположения

максимумов источников). Ситуация аналогична интерференции двух источников света в оптике, где интерференционная картина сильно зависит от расстояния между источниками. Этот сигнал должен наиболее ясно проявляться в стратосфере зимой-весной, поскольку в тропосфере он сильно замаскирован высокочастотным погодным шумом.

Последующие главы диссертации посвящены анализу данных наблюдений с целью подтвердить реальность механизма волновой гипотезы. Для этого были использованы среднемесячные данные спутниковых измерений общего содержания озона TOMS (1979-1992 гг.), зонального ветра банка данных Национального Метеорологического Центра США (NMC) для расчетов стратосферного момента импульса (Stratospheric Angular Momentum - SAM) в слое от 100 гПа до 0,4 гПа, реанализа NCEP/NCAR и аномалий температуры поверхности Тихого, Атлантического и Индийского океанов COADS (NOAA). Стратосферный момент импульса, описывающий супервращение стратосферы в целом относительно Земли, является полезным индикатором как для изучения воздействия планетарных и гравитационных волн на зональную циркуляцию стратосферы, так и для исследования связей с изменениями содержания озона. Выражение для средне-глобального стратосферного момента импульса может быть записано в виде

$$SAM = 2 \pi a^3 g^{-1} \int u \cos^2 \varphi d \varphi dp$$

где u – среднезональный ветер стратосферы, a - радиус Земли, g - ускорение свободного падения, интегрирование распространяется по высоте от 100 гПа до 0,4 гПа (~15-50 км) в глобальном масштабе.

Воздействие планетарных и гравитационных волн на динамику стратосферы проявляется в изменениях зонального ветра, поэтому вариации SAM отражают изменения волновой активности стратосферы и косвенным образом соответствуют принципу Хейнса [Haynes, P.H., et al., J. Atm. Sci., 47, 651-678, 1991], согласно которому изменения циркуляции на данной высоте зависят от интегрального воздействия волн выше этого уровня.

Для выделения главных мод изменчивости полей и исследования нелокальных связей изменяющихся во времени двух полей было использовано разложение по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ) и сингулярный (Singular Value Decomposition -

SVD) метод разложения двух изменяющихся во времени полей для нахождения наиболее сильно связанных мод этих полей.

Были рассчитаны отклонения рассматриваемых полей от их среднего за 1979-1992 гг. (аномалии) для каждого из месяцев, удаляя таким образом сезонный ход каждого из переменных. Описание банков данных и методов анализа содержится в **главе 4** диссертации.

Глава 5 посвящена исследованию изменений атмосферного момента импульса (Atmospheric Angular Momentum - ААМ) и связей вариаций ААМ с изменениями скорости вращения Земли или продолжительности суток (Length Of Day - LOD) на коротких (от суток до 2-3 лет) и более длительных временных масштабах. Ранее было установлено хорошее соответствие вариаций тропосферного (в слое 1000-100 гПа) момента импульса ААМ(100) и продолжительности суток на коротких временных масштабах [Hide,R., and J.O.Dickey, Science, 253, 629-637, 1991]. Однако, в некоторые годы наблюдались заметные рассогласования между ААМ(100) и LOD. Включение стратосферы в расчеты атмосферного момента импульса привело к почти полному совпадению изменений полного атмосферного момента ААМ (в слое 1000 гПа-0,4 гПа) и продолжительности суток на коротких временных масштабах. Это означает, что на этих временных масштабах изменения скорости вращения Земли вызваны атмосферным воздействием [23].

Для проверки надежности данных измерений зонального ветра атмосферы было проведено сравнение изменений полного атмосферного момента импульса с высокоточными измерениями изменений скорости вращения Земли или продолжительности суток. Сравнение показало, что на коротких временных масштабах (от суток до 2-3 лет) причиной изменений скорости вращения Земли является воздействие атмосферы, а на более длительных масштабах медленные процессы внутри Земли дают большое рассогласование в связи изменений атмосферного момента импульса и продолжительности суток. Таким образом, было получено еще одно независимое подтверждение точности используемых данных атмосферных динамических параметров. Рассчитанные для каждого дня изменения полного атмосферного момента показывают существенное увеличение ААМ и LOD во время явлений Эль-Ниньо 1982/83, 1986/87 и 1991/92 годов, а также значительные различия между ААМ и LOD на длительных временных масштабах, которые вызваны воздействием процессов внутри Земли на изменения скорости вращения Земли.

Расчеты среднемесячных аномалий глобально-средних значений тропосферного ААМ(100) и стратосферного моментов показали, что глобально-средняя тропосферная циркуляция наиболее сильно реагирует на явления Эль-Ниньо/Ла-Нина [Rosen, R.D., et al., Science, 225, 411-414, 1984], что также свойственно и глобально-средней стратосферной циркуляции. Однако, в [5,6] показано, что существуют большие различия межгодовых и долгопериодных вариаций тропосферной и стратосферной динамики (**рисунок 1**). Если в течение 1979-1992 гг. в вариациях ААМ(100) нет заметного долгопериодного тренда, то в изменениях глобально-среднего SAM наблюдался резкий переход от сильных отрицательных (восточных) аномалий в 1979 году к большим положительным (западным) аномалиям летом 1980 года. Анализ аномалий зонального ветра стратосферы показал, что этот переход связан с резким усилением западного зонального ветра летом 1980 года в субтропиках нижней стратосферы как в Южном, так и в Северном полушариях [5,6] Эти западные аномалии сохранялись в течение последующих лет, распространяясь в течение десятилетия из субтропиков в средние и высокие широты, следуя так называемой V - структуре долгопериодного распространения аномалий тропосферного атмосферного момента [Dickey, J.O., S.L.Marcus, and R.Hide, Nature, 357, 484-488, 1992]. На рисунке 1 видна южная ветвь V – образного распространения западных аномалий SAM от экватора к полярным широтам Южного полушария в течение октябрей 1980-1992 годов. После 1980 года наблюдался долгопериодный тренд глобального стратосферного момента с квазидвухлетними вариациями и постепенным затуханием сильных западных аномалий, которые возникли летом 1980 года.

Таким образом, в начале 1980-х годов произошел резкий переход циркуляции стратосферы к новому долгопериодному режиму, что привело к формированию динамического "барьера" как в субтропиках, так и в приполярных широтах Антарктики и Арктики в зимне-весенний период.

В **главе 6** исследованы связи межгодовых вариаций содержания озона и стратосферного момента импульса как сезонно - широтных, так и их долготных особенностей для января Северного и октября Южного полушарий в 1979-1992 гг.

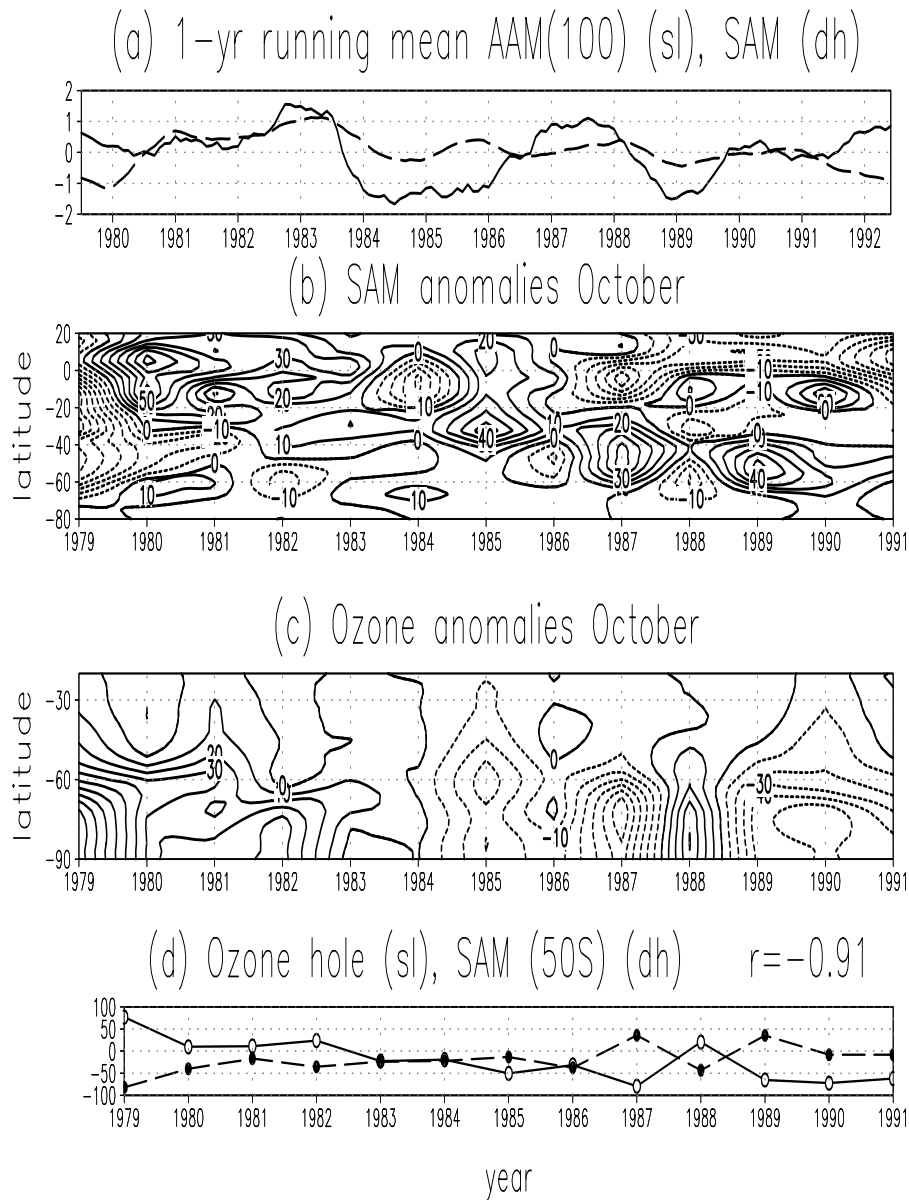


Рис.1. Годовое скользящее среднее аномалий глобального тропосферного момента импульса ААМ(100) (сплошная кривая - sl), стратосферного момента (пунктирная кривая - dh) в 1979-1991 гг. (а). Аномалии стратосферного момента (зонально-средних) (b) и содержания озона (с) для октяблей 1979-1991 гг. Аномалии среднезонального содержания озона на 75°ю.ш. (е.Д.) и стратосферного момента на 50°ю.ш. для октяблей 1979-1991 гг. (d). Единицы относительные, r указывает коэффициент их корреляций.

На рисунке 1 показано также распространение по широте аномалий стратосферного момента и содержания озона для октяблей 1979-

1991 г. Видно близкое соответствие межгодовых вариаций содержания озона над Антарктикой и стратосферного момента в средних 40° ю.ш. - 60° ю.ш. южных широтах, где наблюдается высокая межгодовая изменчивость стратосферной циркуляции: - положительные (западные) аномалии SAM соответствуют уменьшению озона, в то время как отрицательные (восточные) аномалии SAM - увеличению озона, например, в октябре 1988 года [4,5,7] Коэффициент корреляции между эволюцией озоновой дыры и изменениями стратосферной динамики в окрестности полярного вихря Антарктики очень большой (-0,91) и статистически значим на 95% уровне достоверности. Преобладание западных аномалий SAM в средних широтах Южного полушария и V - образное распространение (южная ветвь) западных аномалий от экватора к высоким широтам в течение десятилетия привело к сильной изолированности стратосферного вихря Антарктики после начала 1980-х годов и создало термодинамические условия (низкие температуры в полярном вихре Антарктики, формирование полярных стратосферных облаков, уменьшение вихревого обмена озона со средними широтами) для химических механизмов разрушения озонового слоя над Антарктикой в зимне-весенний период. Анализ сезонно-широтного хода зонального ветра стратосферы показал, что межгодовые вариации стратосферной циркуляции вызваны изменениями волновой активности стратосферы, а не влиянием изменений радиационного режима из-за уменьшения озона. Например, наибольшее усиление западных ветров в нижней стратосфере Южного полушария происходило в июне-августе перед появлением озоновой дыры в Антарктике, что не может быть вызвано влиянием уменьшения озона на радиационный режим и динамику стратосферы [14]. Аналогичная картина связей межгодовых зонально средних вариаций стратосферной циркуляции и содержания озона наблюдается в Северном полушарии в январе-марте с несколько меньшими корреляциями, что связано с большими долготными неоднородностями изменений содержания озона в Северном полушарии.

Проведен спектральный фурье-анализ межгодовых вариаций стратосферного момента и содержания озона с выделением квазидвухлетних колебаний в спектральном интервале 18-32 месяца и долгопериодных колебаний в интервале более 39 месяцев. В этих спектральных интервалах также наблюдаются сильные корреляции вариаций среднезональных значений стратосферного момента в окрестности полярного вихря Антарктики и соответствующих компонентов изменений антарктической озоновой дыры. Ранее

[Garcia,R., and S.Solomon, Geoph. Res. Lett., 14, 848-851, 1987] были обнаружены связи вариаций озоновой дыры в Антарктике для 1979-1986 гг. с экваториальным квазидвухлетним циклом (КДЦ) зонального ветра нижней стратосферы: при западной фазе КДЦ происходило уменьшение озона над Антарктикой, а при восточной фазе - относительное увеличение. Однако, после 1988/89 гг. эти связи не наблюдались. Анализ квазидвухлетней компоненты SAM аномалий для октября показал, что причиной этого нарушения связей является не усиление антропогенных воздействий (С.Соломон, частное сообщение), а долгопериодные изменения соответствия квазидвухлетних связей циркуляции стратосферы вблизи экватора, средних и высоких широт Южного полушария. После 1987/88 гг. эти связи изменились на противоположные, поэтому не наблюдалось корреляций озоновой дыры и экваториального КДЦ после 1988 года, хотя связи вариаций озона над Антарктикой с квазидвухлетней компонентой циркуляции стратосферы в средних южных широтах наблюдаются всегда [7].

Межгодовые и долгопериодные вариации атмосферной циркуляции и озонового слоя имеют большие долготные неоднородности, связанные с воздействием планетарных и гравитационных волн на зональную динамику и состав атмосферы. В главе 6 проведен также анализ долготной структуры связей изменений содержания озона и стратосферного момента импульса, рассчитанного в зависимости от широты и долготы, если в (1) не проводить усреднение по широте.

Расчитанные линейные тренды содержания озона, выраженные в единицах Добсона (е.Д.) в год для январей 1979-1992 гг. обнаружили хорошо известные максимумы уменьшения озона над Европой (-4,5 е.Д./год), восточной Сибирью и Тихим океаном (-3,5 е.Д./год). Над Лабрадором и Канадским арктическим архипелагом в этот период наблюдалось некоторое увеличение озона (1,5 е.Д./год), что, само по себе, может свидетельствовать о большой роли динамики в изменчивости озонового слоя. Эти положительные тренды близки к 95% уровню статистической значимости. В Южном полушарии также есть области либо с положительными (1 е.Д./год) трендами в июле между Африкой и Антарктикой, либо с отсутствием трендов западнее Чили в октябре на фоне очень больших отрицательных трендов (-7 е.Д./год) над Антарктикой [11,17].

Тренды стратосферного момента имеют сложную пространственную структуру как в Северном, так и в Южном полушариях. Структура трендов SAM в Северном полушарии, вероятно, каким-то образом связана с известными дальними связями изменчивости тропосферной динамики [Wallace,J.M., and

D.S.Gutzler, Mon. Wea. Rev., 109, 784-812, 1981]. В высоких широтах Северного полушария наблюдаются противоположные по знаку тренды: в январе 1979-1992 гг. происходило ослабление западных зональных ветров стратосферы в западной Арктике, а в восточной Арктике, наоборот, - ускорение вращения стратосферы. Это означает, что межгодовые вариации влияния планетарных волн на циркуляцию и температуру стратосферы Арктики (межгодовых изменений стратосферных потеплений) имели противоположный характер в западном и восточном полушариях и привели к миграции центра стратосферного вихря Арктики.

Тренды SAM в Южном полушарии (октябрь) также имеют сложную пространственную структуру. Наибольшее усиление западных зональных ветров стратосферы над Антарктикой происходило между Халли Бей и Южным полюсом на 85°ю.ш., 30°з.д., в области, где была открыта озоновая дыра. В субтропиках и средних широтах Южного полушария наблюдаются положительные (западные) тренды SAM над Тихим океаном и отрицательные (восточные) тренды над Атлантикой к востоку от Анд.

Как хорошо известно [Andrews, D.G., and M.E.McIntyre, J. Atmos. Sci., 33, 2031-2048, 1976], лишь небольшая часть стратосферной динамики (остаточная циркуляция) влияет на перенос озона, тепла и момента импульса из-за сильной компенсации упорядоченных и вихревых процессов переноса. Поэтому только часть изменений SAM может быть связана с наблюдаемыми вариациями состава озонового слоя. Проведенный ЭОФ и SVD анализы связей изменений стратосферного момента и содержания озона в целом подтверждают следствия теоремы о неускорении, описывающей остаточную циркуляцию. В Северном полушарии первая ЭОФ аномалий содержания озона, описывающая 31,4% общей изменчивости, имеет пространственную структуру, очень близкую к картине трендов озона, и ее коэффициент имеет ясно выраженный тренд в течение январей 1979-1992 гг. с некоторыми квазидвухлетними колебаниями. Вторая ЭОФ сравнимого вклада (29,8%) изменчивости в основном ответственна за изменения озона в высоких широтах с ясно выраженными противоположными (дипольными) вариациями между северной частью Тихого океана и северной Атлантикой. Ее коэффициент не имеет заметного тренда в 1979-1992 гг., но в его поведении имеются экстремумы в 1985 и 1991 гг., в годы с сильными стратосферными потеплениями. Третья ЭОФ имеет много меньший вклад (10,8%) в общую изменчивость [12].

Проведенный SVD анализ связей межгодовых вариаций озона и стратосферного момента показал наличие сильных нелокальных корреляций стратосферной динамики и содержания озона как в Северном, так и в Южном полушариях. В Северном полушарии структура и межгодовая изменчивость первой SVD моды аномалий озона (28,5% изменчивости) соответствует второй ЭОФ вариаций озона, которая описывает изменения озона в высоких широтах. Соответствующая SVD мода (14,6%) аномалий SAM описывает дипольные изменения стратосферной динамики между западной и восточной Арктикой, а также дипольные изменения по широте с наиболее сильными различиями между Тихим океаном, США и Сибирью. **Рисунок 2** иллюстрирует сильные корреляции содержания озона и стратосферной динамики в районах с наиболее сильными связями, найденными при помощи SVD анализа.

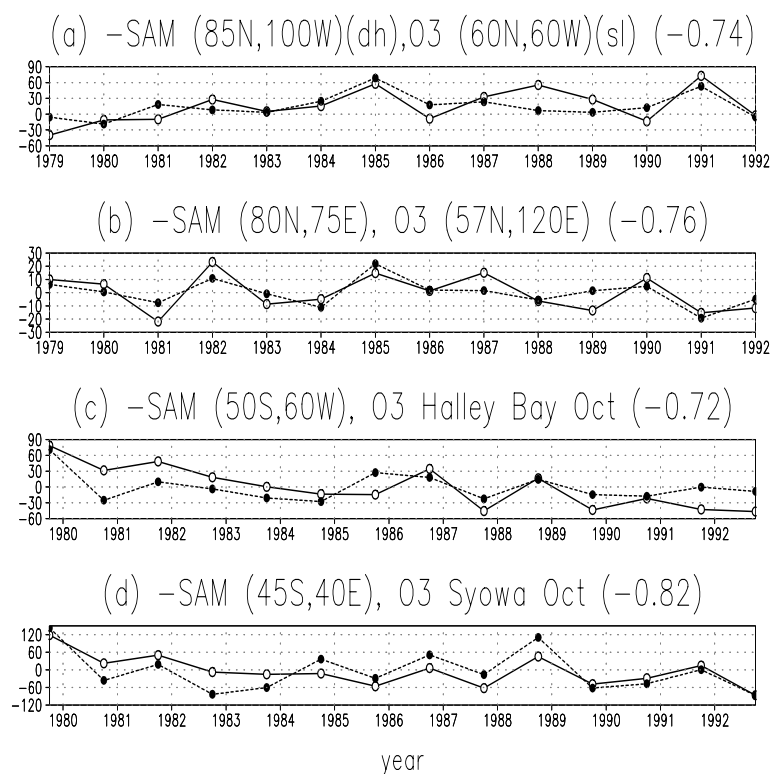


Рис.2. Аномалии содержания озона (сплошные кривые) и стратосферного момента (с обратным знаком, пунктир) в наиболее сильно связанных географических районах для января (a,b)

Северного и октября (с,d) Южного полушарий в 1979-1997 гг. в относительных единицах. В скобках указаны коэффициенты их корреляций.

В Южном полушарии (октябрь) также наблюдаются сильные связи изменений стратосферной динамики и содержания озона. Первая ЭОФ (65,8% изменчивости), описывающая поведение озоновой дыры в Антарктике, почти точно совпадает с первой SVD модой (64,2%) связей содержания озона и стратосферного момента. Замечательной чертой пространственных структур этих мод являются дипольные изменения озона с некоторым повышением озона в октябре 1979-1992 гг. над Тихим океаном к западу от Чили и понижением озона над Атлантикой к востоку от Аргентины. Пространственная структура первой SVD (28,9%) аномалий стратосферного момента имеет сложную структуру с чередованием как западных так и восточных аномалий. В средних широтах (40°ю.ш.-60°ю.ш.) наблюдается тенденция к западным аномалиям SAM, что соответствует усилению изолированности стратосферного вихря Антарктики в 1979-1992 гг. Рисунок 2 показывает также корреляции содержания озона и стратосферного момента в критических точках Южного полушария, где имеют место наибольшие связи озона и стратосферной циркуляции. Сильные корреляции поведения озоновой дыры с изменениями стратосферной динамики в средних широтах находятся в соответствии с результатами анализа для зонально-средних значений.

В главе 7 исследованы связи межгодовых аномалий температуры поверхности Мирового океана, стратосферного момента импульса и содержания озона в Северном и Южном полушариях. Анализ проведен для аномалий ТПО как для каждого из океанов (Тихого и Атлантического в Северном полушарии), (Тихого, Атлантического и Индийского в Южном полушарии), так и для их совместного влияния в каждом из полушарий для января в Северном и октября в Южном полушариях.

Самыми заметными событиями в Мировом океане являются явления Эль-Ниньо/Ла-Нина в Тихом океане, связанные с большими аномалиями ТПО в экваториальной части Тихого океана. Был проведен анализ связей этих явлений с межгодовыми изменениями содержания озона и стратосферного момента как для Северного, так и для Южного полушарий. Первая SVD мода аномалий ТПО Тихого океана этих связей, рассчитанная для широтной зоны 12°ю.ш.-60°с.ш., представляет собой первую ЭОФ (40% изменчивости), которая описывает явления Эль-Ниньо/Ла-Нина с сильными

повышениями температуры Тихого океана вблизи экватора во время Эль-Ниньо 1982/83, 1986/87 и 1991/92 гг. Корреляции изменений содержания озона Северного полушария в январе с коэффициентом этой SVD моды (индексом Южной Осцилляции) невелики, за исключением Европы (~60%) и соответствующая SVD мода аномалий озона не является какой либо главной модой (ЭОФ) изменений озона. То же самое верно и для связей индекса Южной Осцилляции с межгодовыми вариациями внетропической стратосферной циркуляции Северного полушария. Корреляции озона над Европой с явлениями Эль-Ниньо могут быть следствием некоторой когерентности аномалий ТПО экваториального Тихого океана и аномалий ТПО Атлантики к западу от Англии, как показал SVD анализ связей ТПО Тихого и Атлантического океанов. Таким образом, прямое влияние явлений Эль-Ниньо/Ла-Нина на внетропическую стратосферу не является большим. Эти результаты не означают, что явления Эль-Ниньо не влияют на циркуляцию атмосферы в глобальном масштабе. Известно [Jacobs, G.A., et al., Nature, No.370, 360-363, 1994], что Эль-Ниньо обладают долгопериодной "памятью", например, сильное Эль-Ниньо 1982/83 гг. привело к изменениям течения Куроисио несколькими годами позже, т.е. изменения аномалий ТПО в средних и высоких широтах Тихого океана могут зависеть от предшествующих событий Эль-Ниньо/Ла-Нина.

Совершенно другая картина наблюдается для связей межгодовых вариаций содержания озона, стратосферной циркуляции и ТПО Атлантики в Северном полушарии. Первая SVD мода аномалий ТПО Атлантики их связей с изменениями содержания озона почти точно совпадает с главной модой ЭОФ1 (23,4% изменчивости) ТПО Атлантики, а соответствующая SVD мода вариаций озона близка к ЭОФ2 (29%), которая описывает изменения озона в высоких широтах Северного полушария. Как показал SVD анализ, связи аномалий ТПО Атлантики и стратосферного момента также велики и воспроизводят главные черты их изменчивости. Следовательно, в отличие от явлений Эль-Ниньо/Ла-Нина, межгодовые аномалии ТПО Атлантики (особенно дипольные изменения ТПО в районе Гольфстрима и северо-атлантического течения) очень сильно связаны с изменениями стратосферной циркуляции и озона в средних и высоких широтах [12].

Таким образом, роль межгодовых и долгопериодных изменений ТПО Атлантики может быть очень важной в изменчивости волновой активности Северного полушария в зимне-весенний период и озонового слоя. Этот вывод также подтверждается близким соответствием пространственных структур Северо-Атлантического

Колебания и Арктической Осцилляции в атлантическом секторе [Wallace, J.M. Quart. J. Roy. Met. Soc., 126, 564, 791-805, 2000].

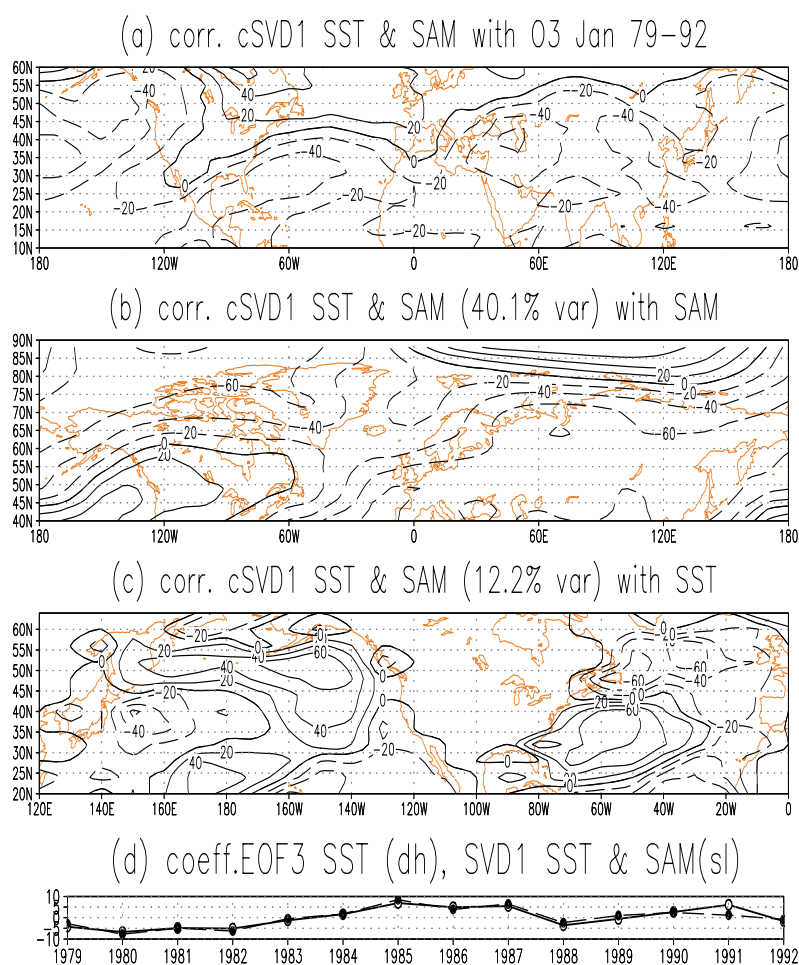


Рис.3 Первые SVD моды связей аномалий содержания озона (а), стратосферного момента (б) и ТПО Тихого и Атлантического океанов (с), выраженные в виде корреляций (в%) аномалий соответствующего поля с межгодовыми изменениями коэффициента первой SVD моды связей аномалий ТПО и стратосферного момента (сплошная кривая, d). Пунктиром показан коэффициент третьей ЭОФ аномалий ТПО.

Механизм волновой гипотезы предполагает интерференцию орографического (Скалистые горы) и термического источника стационарных волн, связанного с аномалиями ТПО как Тихого, так и Атлантического океанов. Поэтому был проведен SVD анализ связей изменений содержания озона, стратосферного момента и совместных аномалий ТПО севернее 20°с.ш., результаты которого показаны на **рисунке 3**. Пространственные структуры первых SVD

мод межгодовых вариаций содержания озона и SAM близки к первым SVD модам связей озона и стратосферного момента. С этими модами очень сильно связана первая SVD мода аномалий ТПО северного Тихого и Атлантического океанов (рисунок 3с), структура которой характеризуется дипольными изменениями ТПО с центрами действий вблизи Курошио (35° с.ш., 150° в.д.), южнее Алеутов (50° с.ш., 150° з.д.), и в Атлантике вблизи Ньюфаундленда (50° с.ш., 45° з.д.), Гольфстрима (35° с.ш., 55° з.д.). Анализ межгодовых аномалий ТПО отдельно для Тихого и Атлантического океанов показал, что пространственная структура первой SVD моды (рисунок 3с) в Тихом океане близка к структуре ЭОФ3 (12,7% изменчивости) аномалий ТПО Тихого океана, а в Атлантике практически совпадает со структурой ЭОФ1 ТПО отдельно для Атлантики. Для совместных аномалий ТПО как структура SVD моды, так и поведение ее коэффициента разложения почти совпадают с характеристиками ЭОФ3 (11% изменчивости) совместных ТПО аномалий. Это означает, что лишь очень тонкие черты аномалий ТПО Тихого океана и главные черты ТПО Атлантики сильно связаны с межгодовыми вариациями стратосферного вихря Арктики, который имеет дипольную структуру в западном и восточном полушариях, и содержания озона в высоких широтах Северного полушария. Отметим, что Северо-Атлантическое Колебание, описывающее дипольные изменения приземного давления между Исландским циклоном и Азорским антициклоном, тесно связано с первой ЭОФ аномалий ТПО Атлантики [Wallace, J.M., C. Smith, and Q. Jiang., J. Climate, 3, 990-998, 1990].

Большую роль в межгодовых изменениях стратосферного вихря Арктики и озона в высоких широтах играют стратосферные потепления. Причиной стратосферных потеплений является воздействие планетарных волн на средний зональный поток, в результате которого температура стратосферы Арктики повышается на $20-30^{\circ}\text{C}$, а западный зональный ветер стратосферы испытывает сильное торможение и даже может происходить реверс на восточное направление. Действительно, рассчитанная первая ЭОФ (43% изменчивости) аномалий зонального ветра на 30 гПа показывает сильное изменение западного ветра в высоких широтах и над Атлантикой на восточные ветры во время сильных стратосферных потеплений в январе 1985 и 1987 гг. Анализ связей изменений зонального ветра стратосферы и тропосферы показал, что в области полярного струйного течения изменения зонального ветра тропосферы происходят когерентно со стратосферным ветром, т.е. они имеют баротропный характер. Однако, над Атлантикой в

верхней тропосфере сильное торможение ветра во время стратосферных потеплений не наблюдается, а в средней и нижней тропосфере появляется дипольная по широте структура изменений зонального ветра с ослаблением западных ветров над Исландией и усилением - над Гренландией и Азорами. Кроме того, в верхней тропосфере над Тихим океаном исчезает усиление западного стратосферного ветра во время сильных стратосферных потеплений. Вопрос, который рассмотрен в диссертации - какие области аномалий ТПО Тихого и Атлантического океанов севернее 20° с.ш. наиболее сильно связаны с вариациями ветра на 30 гПа, т.е. с возникновением стратосферных потеплений? Проведенный SVD анализ обнаружил дипольную структуру аномалий ТПО в Тихом океане (с уменьшением ТПО в районе Куроисио и увеличением - в Алеутском течении во время сильных стратосферных потеплений) и структуру в виде "сэндвича" в Атлантике (с уменьшением ТПО вблизи Ньюфаундленда, увеличением - в районе Гольфстрима и уменьшением - вблизи побережья Африки). Эта структура очень близка к показанной на рисунке 3, что может свидетельствовать о ее большой роли в возбуждении стратосферных потеплений.

Результаты, приведенные выше, имеют непосредственное отношение к Арктической Осцилляции [Thompson, D.W.J., and Wallace, J.M., *Geoph. Res. Lett.* 25, 1297-1300, 1998]. Томпсон и Уоллес показали, что первая ведущая мода (ЭОФ1) межгодовых вариаций давления и геопотенциала на 1000 гПа в области севернее 20° с.ш. тесно связана с ведущей модой изменчивости стратосферного вихря Арктики, поэтому эта мода была названа Арктической Осцилляцией (АО). В атлантическом секторе основные особенности этой моды на 500 гПа совпадают с чертами Северо - Атлантического Колебания, а их межгодовые изменчивости подобны друг другу. Таким образом, Арктическая Осцилляция и Северо-Атлантическая Колебание очень близки и, вероятно, являются основными модами, которые контролируют межгодовую и долгопериодную изменчивость циркуляции внетропической тропосферы и стратосферы Арктики. Томпсон и соавторы показали также, что индекс АО, определенный как коэффициент первой ЭОФ вариаций давления на уровне моря, приземной температуры и осадков, сильно изменился после конца 1960-х годов. Таких изменений не наблюдалось с начала 20-го века. Положительная тенденция индекса АО в последние 4 десятилетия свидетельствует о значительных изменениях современного климата по сравнению с прошлым и одновременно большую изолированность стратосферного вихря Арктики. Была также обнаружена сильная долготная симметрия пространственных структур первых ЭОФ (так

называемых круговых мод) изменчивости геопотенциала на 1000 гПа и на стратосферных уровнях в высоких широтах Северного и Южного полушарий. Несмотря на большие различия циркуляции атмосферы в Северном и Южном полушариях, связанных с различиями волновой активности, поведение стратосферного вихря Арктики подобно сильно изолированному вихрю Антарктики (Антарктической Осцилляции) в последние десятилетия. Причина и физический механизм Арктической и Антарктической Осцилляций до сих пор неизвестны.

Поскольку Арктическая Осцилляция тесно связана с межгодовыми вариациями стратосферного вихря Арктики, был проведен SVD анализ связей SAM севернее 58° с.ш. (SAMPV), содержания озона севернее 40° с.ш. и аномалий ТПО Тихого и Атлантического океанов севернее 20° с.ш. для январей 1979-1992 гг. [12] Результаты практически совпадают с показанными на рисунке 3с большими вкладами в изменчивость (61%) первой моды стратосферного момента вихря Арктики. Таким образом, причиной Арктической Осцилляции может быть внешнее возбуждение АО аномалиями ТПО Тихого и Атлантического океанов, особенно в диполе через Скалистые горы, что хорошо согласуется с механизмом волновой гипотезы. Поскольку первая ЭОФ аномалий ТПО Атлантики связана с Северо-Атлантическим Колебанием, становится ясным близость Арктической Осцилляции в атлантическом секторе и Северо-Атлантического Колебания. Рисунок 3 показывает также, что АО не является круговой модой (т.е. зонально-симметричной) даже в стратосфере, межгодовые изменения стратосферной динамики в Арктике имеют дипольную структуру в западном и восточном полушариях, с которой связаны дипольные изменения содержания озона между, например, Лабрадором и восточным побережьем Тихого океана по крайней мере в 1979-1992 гг. Эффекты стратосферных потеплений на термодинамику стратосферы Арктики и озоновый слой имели также противоположный характер в западном и восточном полушариях. Главные (ведущие) моды связей межгодовых вариаций аномалий ТПО Тихого, Атлантического океанов, циркуляции стратосферы и содержания озона и их вклады в изменчивость показаны на этой схеме:

Северное полушарие

ЭОФ 3 (12%) ТПО >>> ЭОФ 1 (61%) SAMPV >>> ЭОФ 2 (29%) ОЗ

Для Южного полушария результаты аналогичного анализа показаны на **рисунке 4** [20,21]. Первая SVD мода озона связей аномалий ТПО Южных океанов и содержания озона совпадает с первой ЭОФ (65,8%) и описывает эволюцию озоновой дыры в Антарктике. Соответствующая SVD мода аномалий ТПО (14,3%) имеет сложную пространственную структуру, наиболее заметными чертами которой являются дипольные изменения ТПО Тихого и Атлантического океанов в диполе через Анды, Атлантики и Индийского океанов в диполе через Африку. Расчеты ЭОФ аномалий ТПО показали, что эта мода близка ко второй ЭОФ (16,4%). Главные моды связей межгодовых вариаций аномалий ТПО Тихого, Атлантического и Индийского океанов, циркуляции стратосферы и содержания озона в Южном полушарии и их вклады в изменчивость показаны на этой схеме:

Южное полушарие

ЭОФ 2 (16%) ТПО>>>ЭОФ 1 (36%) SAM>>>ЭОФ 1 (63%) ОЗ

Рисунок 4 иллюстрирует также связи разности аномалий ТПО в диполе через Анды, стратосферного момента в окружении полярного вихря Антарктики и содержания озона на станции Халли Бей (76° ю.ш., 27° з.д.), где была открыта озоновая дыра. Таким образом, и в Южном полушарии вероятным механизмом возбуждения Антарктической Осцилляции может быть механизм волновой гипотезы и это объясняет подобие Арктической и Антарктической Осцилляций.

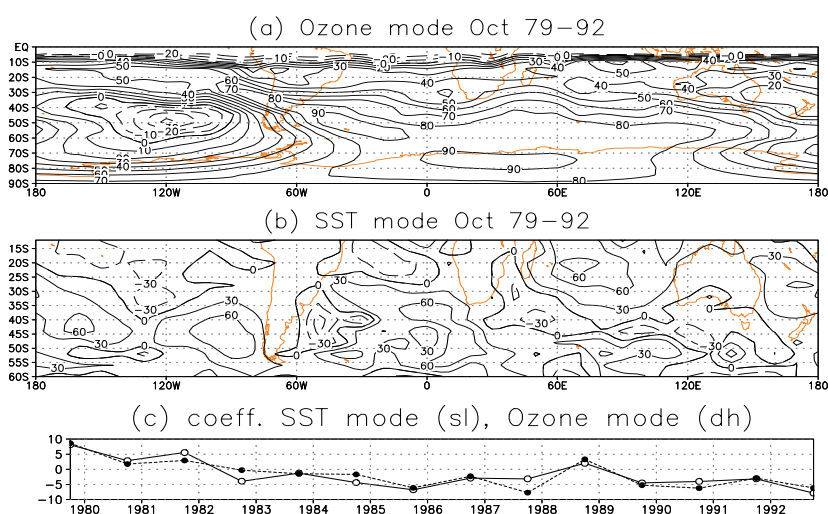


Рис.4 Первые SVD моды связей аномалий содержания озона (а) и ТПО Южных океанов (б), выраженные в виде корреляций (в%)

аномалий соответствующего поля с межгодовыми изменениями коэффициента первой SVD моды связей аномалий ТПО и содержания озона (сплошная кривая,с). Пунктиром показан коэффициент SVD моды аномалий содержания озона.

В главе 8 представлены результаты эмпирических оценок относительной роли динамических и химических факторов в истощении озонового слоя. [8,18]. Эти оценки основаны на обнаруженных сильных корреляциях изменчивости озонового слоя с межгодовыми вариациями динамики стратосферы. Было проведено разделение наблюдаемых изменений содержания озона на "динамические" и "химические" вариации при помощи линейного регрессионного анализа. Реальные аномалии содержания озона проектировались на сумму нескольких SVD мод аномалий стратосферного момента, остаточный член регрессии интерпретировался как влияние "химических" факторов. Анализ показал, что для реконструкции "динамических" аномалий озона достаточно использовать 5-10 SVD мод стратосферного момента, поскольку вклад высших мод пренебрежимо мал. После реконструкции были рассчитаны линейные тренды "динамических" и "химических" вариаций содержания озона для января Северного и октября Южного полушарий в 1979-1992 гг

Безусловно, этот простой метод оценок относительной роли антропогенных и естественных факторов в истощении озонового слоя имеет большие недостатки, связанные с учетом обратных положительных и отрицательных связей изменений химического состава, радиационного режима и динамики стратосферы. Поэтому эмпирические оценки, полученные в данной работе нужно рассматривать как предварительные и имеющие не количественный, а качественный характер. Для среднезональных изменений эмпирические оценки показали, что относительный вклад "химических" факторов не превышает 40% в наблюдаемых трендах содержания озона, остальная часть вызвана динамическими изменениями атмосферы. Эти оценки по порядку величины близки к оценкам, полученным совершенно другими методами, например, связей изменений содержания озона с индексом Арктической Осцилляции в марте 1979-1993 гг. [Thompson, D.W.J., Wallace, J.M., and G.C.Hegerl, J.Climate, 13, 1018-1035, 2000]. Также было обнаружено близкое соответствие долгоотно-широтной структуры "динамических" трендов озона и проекции на индекс АО. В январе Северного полушария наибольшее влияние "химических" факторов (~50%) было обнаружено над Европой и восточным побережьем США, а большое уменьшение озона над Тихим океаном имеет динамическую природу. В Южном полушарии (октябрь) влияние

динамики, как не удивительно, наиболее сильно проявляется в области станции Халли Бей, а "химических" факторов (~60-90%) - над тихоокеанским побережьем Антарктики.

Большая роль естественных динамических факторов в истощении озонового слоя подтверждается неожиданным увеличением озона над Антарктикой и сильным уменьшением площади озоновой дыры осенью 2002 года [13]. На **рисунке 5** показаны изменения среднемесячных зонально-средних содержаний озона для сентябрей 1979-2002 гг. на 75° ю.ш. и аномалий зонального ветра на 10 гПа, 55° ю.ш. в окрестности стратосферного вихря Антарктики. Непрерывное уменьшение озона над Антарктикой происходило в эти годы, за исключением 1988 года, когда озоновая дыра была намного меньше, чем в 1987 году. В сентябре 2002 года произошло сильное увеличение озона (особенно в индийском и тихоокеанском секторах Антарктики), которое даже превысило в некоторых регионах уровень 1979 года. Такое аномально большое увеличение озона над Антарктикой не может быть следствием ограничения промышленного производства фреонов и галонов, предусмотренного Монреальским Протоколом, поскольку время жизни фреонов достаточно большое, чтобы ограничение их промышленного производства могло бы привести к восстановлению озонового слоя над Антарктикой уже в 2002 году [WMO/UNEP International Report 'Scientific Assessment of Ozone Depletion:1998'-Report NO.44, 1999]. Согласно теоретическим оценкам, проведенным в лучших трехмерных моделях циркуляции и химии стратосферы и моделях общей циркуляции атмосферы с учетом стратосферной химии, ограничение антропогенных воздействий должно привести к восстановлению озонового слоя лишь в 2030-2050 годах! Неопределенности теоретических предсказаний восстановления озонового слоя связаны с неучетом в моделях роли естественных долгопериодных динамических изменений атмосферы в истощении озонового слоя.

Причиной аномально большого увеличения озона над Антарктикой в 2002 году является сильное ослабление изолированности стратосферного вихря Антарктики, повышение температуры внутри вихря, исчезновение полярных стратосферных облаков и намного меньшей эффективности химических механизмов разрушения озонового слоя над Антарктикой, чем в годы с большой озоновой дырой. Четкое соответствие межгодовых вариаций динамики стратосферы вне полярного вихря Антарктики и озоновой дыры (рисунки 1,5) свидетельствует о большой роли естественных факторов в истощении озонового слоя.

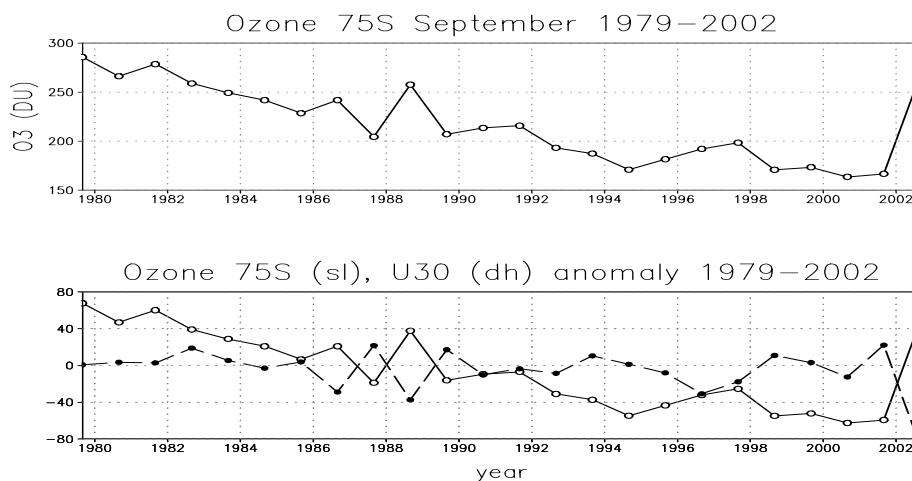


Рис.5. Среднемесячные (зонально-средние) изменения содержания озона в сентябре 1979-2002 гг. в области озоновой дыры, их аномалии (сплошные кривые) и аномалии зонального ветра (пунктир) на высоте 30 гПа и широте 55° ю. ш. в окрестности полярного вихря Антарктики [24].

Будущие исследования долгопериодных изменений во взаимодействующей системе океан – атмосфера – озоновый слой смогут более точно оценить влияние естественных и антропогенных факторов на озоновый слой Земли.

В **Заключении** изложены основные выводы и перспективы дальнейших исследований.

Основные публикации по теме диссертации

1. Жадин Е.А. Планетарные волны и межгодовые аномалии озона в полярных районах, Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 26, 1156-1160, 1990.
2. Жадин Е.А. Межгодовые вариации озона над Европой и аномалии температуры океана в Атлантике, Метеорология и Гидрология, 7, 22-26, 1992.
3. Жадин Е.А. Долгопериодная цикличность температуры поверхности океана, температуры нижней стратосферы и озона в умеренных широтах, Метеорология и Гидрология, 5, 52-59, 1993.

4. Жадин Е.А. Аномалии озонового слоя и стратосферный угловой момент, *Метеорология и гидрология*, 7, 48-55, 1995.
5. Жадин Е.А. Распространение долгопериодных аномалий зональной циркуляции стратосферы, *Метеорология и гидрология*, 7, 36-48, 1996.
6. Жадин Е.А. Диагноз долгопериодных изменений динамики стратосферы, *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, 33, 6, 787-794, 1997.
7. Жадин Е.А. Долгопериодные вариации озона и циркуляции стратосферы, *Метеорология и гидрология*, 2, 68-80, 1999.
8. Жадин Е.А. Эмпирический метод оценок воздействия естественных и антропогенных факторов на общее содержание озона, *Метеорология и гидрология*, 3, 16-28, 2000.
9. Жадин Е.А. Разрушение озонового слоя - что дальше? *Экология и промышленность России*, 4-7, август 2000.
10. Жадин Е.А. Являются ли фреоны единственной причиной изменений озонового слоя Земли? *Экология и промышленность России*, 30-31, ноябрь 2000.
11. Жадин Е.А. Возможные причины увеличения содержания озона в отдельных областях Северного и Южного полушарий в 1979-1992 гг., *Метеорология и гидрология*, 4, 50-59, 2001.
12. Жадин Е.А. Арктическое колебание и межгодовые вариации температуры поверхности Атлантического и Тихого океанов, *Метеорология и гидрология*, 8, 28-40, 2001.
13. Жадин Е.А. Озоновая дыра в Антарктике начинает исчезать? *Экология и промышленность России*, 27-29, Декабрь, 2002.
14. Жадин Е.А., Н.А.Дианский, Анализ связей межгодовых вариаций общего содержания озона и циркуляции стратосферы, *Метеорология и гидрология*, 9, 25-33, 1997.
15. Жадин Е.А., Н.Д.Петушков, Диагностика аномалий озона в Северном полушарии, *Метеорология и гидрология*, 6, 57-61, 1993.
16. Жадин Е.А., В.Н.Терлецкий, Вариации озона над Антарктикой в 1987-1988 гг., *Метеорология и гидрология*, 10, 23-28, 1990.
17. Кадыгров В.Е., Е.А.Жадин, Аномалии и тренды содержания озона в 1979-1992 гг., *Оптика атмосферы*, 12, 1, 46-53, 1999.
18. Jadin, E.A., An empirical method for predictions of ozone layer anomalies, *Proceedings of International Symposium on Atmospheric Chemistry and Future Environment*, pp. 334-337, Nagoya, 11-13 November, 1997, Japan.
19. Jadin, E.A. Interannual variability of total ozone and stratospheric angular momentum, *Int. Journ. Geomagnetism and Aeronomy*, 1, No.2, 169-180, 1999.

- 20.**Jadin, E.A. Interannual natural variations of the ozone layer, stratospheric circulation and sea surface temperature, Proceedings of the 8-th Scientific Assembly of IAMAS, Abstracts, 126-127, Innsbruck, Austria, 10-18 July 2001.
- 21.**Jadin, E.A. Arctic and Antarctic Oscillations, Ozone Changes and SST anomalies, International Symposium on Stratospheric Variations and Climate, Abstracts, 16-19,12-15 November,2002, Kyushi University, Fukuoka, Japan.
- 22.**Jadin,E.A., and N.A.Diansky, Interannual variations of total ozone and stratospheric dynamics, Proceedings of the First SPARC General Assembly, Melbourn, December, 2-6, 1996.
- 23.**Jadin E.A., and K.Yamazaki, Changes in the Earth's rotation and the atmospheric angular momentum on intra-annual and decadal time scales, Papers in Geophysics and Meteorology, 45, 3, 113-120, 1995.
- 24.**Жадин Е.А., Варгин П.Н., Антарктическая озоновая дыра 2002 года. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2004, в печати.

Во всех работах, подготовленных в соавторстве, диссертант осуществлял постановку задачи, проводил расчеты и писал полностью текст каждой статьи.