

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.6>

УДК: 621.371+537.87

СРАВНЕНИЕ И КОРРЕЛЯЦИИ СРЕДНЕСЕЗОННЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В 1996-2017 ГГ.

К.П. Гайкович ¹, С.Б. Розанов ^{2,3}

**¹ Институт физики микроструктур РАН,
ГСП-105, г. Нижний Новгород, 603950**

**² Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
ГСП-1, Москва, 119991**

**³ Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений,
141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП
«ВНИИФТРИ»**

Статья поступила в редакцию 14 июля 2025 г.

Аннотация. Представлены результаты статистического анализа и сравнения среднесезонных высотных профилей содержания озона в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, полученных по данным наземных СВЧ радиометрических измерений, и соответствующих профилей температуры по спутниковым данным. В анализ были включены данные для осеннего, зимнего и весеннего сезонов декад 1996-2006 и 2007-2017 гг., совпадающих с 23-м и 24-м циклами солнечной активности. По этим данным были получены среднесезонные высотные профили параметров и их вариации, совместные озон-температурные корреляционные и ковариационные функции, межвысотные корреляционные и ковариационные функции, временные структурные, автокорреляционные и автоковариационные функции, а также частотные спектры ковариаций. При сравнении данных статистических параметров для двух декад обнаружены статистически значимые корреляции и тренды.

В частности, в зимнем сезоне декады декаде 2007-2017 гг. с пониженной солнечной активностью в среднесезонном профиле температуры наблюдался значительный спад в основной части озонового слоя, до $-8,4$ К на высоте около его максимума 37 км. Результат особенно интересен потому, что этот спад средnezимней температуры коррелирует с наиболее значительным (до 28 % на 38-39 км) спадом в средnezимних вариациях содержания озона выше 29 км, а также со спадом в среднедекадных вариациях озона, который был обнаружен нами ранее. Впервые в исследованиях озоносферы были применены и получены для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. среднесезонные межвысотные совместные озон-температурные корреляционные и ковариационные функции. В частности, выявлены области наибольшей корреляции озона с температурой, которые наблюдаются для температуры на высотах ниже 35 км, и области наибольшей антикорреляции, которые находятся выше этой высоты.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия, высотные профили озона и температуры, стратосфера, статистический анализ.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН, проект FFUF-2024-0019.

Автор для переписки: Гайкович Константин Павлович, gaikovich@mail.ru

Введение

Статья является расширенной публикацией статистического анализа среднесезонных статистических параметров содержания озона и температуры в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, частично представленных в [1], и продолжает наши исследования [2,3], связанные со статистическим анализом ансамблей высотных профилей содержания озона, сформированных по данным наземных СВЧ радиометрических измерений в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) за период с 1996 по 2017 гг. В данной статье для исследования озон-температурных взаимосвязей в анализ включены ансамбли соответствующих высотных профилей температуры из имеющихся баз данных.

В настоящее время большая часть информации о глобальном распределении озона и температуры в стратосфере и мезосфере получается из спутниковых измерений [4]. Однако, большой масштаб горизонтального осреднения, а также вариации времени наблюдения и траектории спутника ограничивают точность измерений, а относительно небольшой период спутниковых программ ограничивает возможности долгосрочных наблюдений. В этой связи важную роль приобретает наземное дистанционное зондирование озона, проводимое в одном и том же месте и с использованием одного метода, которое позволяет получать длительные ряды однородных данных со значительно лучшим горизонтальным разрешением. Такие долговременные ряды высотных профилей содержания озона были получены в результате радиометрических измерений спектра микроволнового теплового излучения атмосферы на частотах вращательной линии озона с центром на частоте 142,175 ГГц в ФИАН в Москве (55,70° с.ш., 37,57° в.д.) с января 1996 г. по май 2017 г.) [2] и в университете Берна (46,95° с.ш., 7,44° в.д.) с января 1997 г. по январь 2015 г.) [5].

Данные, полученные в ФИАН, представляют особый интерес не только в связи с их продолжительностью, но и с тем, что их начало практически совпадает с началом восстановления озонового слоя [4], а период измерений почти точно соответствует 23-му и 24-му циклам солнечной активности. Географическое положение Москвы в зоне сильных вариаций стратосферного озона, связанных с планетарными волнами и переносом воздушных масс различной природы, включая приходы в холодные месяцы бедного озоном воздуха полярного стратосферного вихря, позволяет исследовать как эти процессы, так и связанные с ними тренды стратосферного озона.

В предыдущих статьях [2,3] был представлен статистический анализ данных наблюдений за озоновым слоем в 1996-2017 гг. Этот анализ интересен тем, что 23-й и 24-й солнечные циклы значительно различались по своей активности. Набор данных был разделен на два 11-летних ансамбля 1996-2006 и 2007-2017 годов. Чтобы повысить статистическую значимость результатов,

среднемесячные профили относительного содержания озона для каждого анализируемого месяца (с сентября по май) были усреднены за 11 лет каждой из декад. Чтобы оценить общие изменения между десятилетиями, были определены среднедекадные параметры путем усреднения среднемесячных профилей за все месяцы анализа.

Наиболее неожиданным и нуждающимся в объяснении результатом проведенного статистического анализа является обнаружение резкого уменьшения изменчивости среднеквадратичных отклонений профиля озона выше 30 км в 2007–2017 гг. по сравнению с 1996–2006 гг. [2,3]. В качестве основных факторов, которые могли привести к такому значительному уменьшению, мы рассматривали различный характер крупномасштабной динамики стратосферы Северного полушария в рассмотренные периоды (декады), а также сильное падение солнечной активности в 24-м цикле 2007-2017 гг. по сравнению с 23-м циклом 1996-2006 гг., показанное на Рис. 1 [2,3].

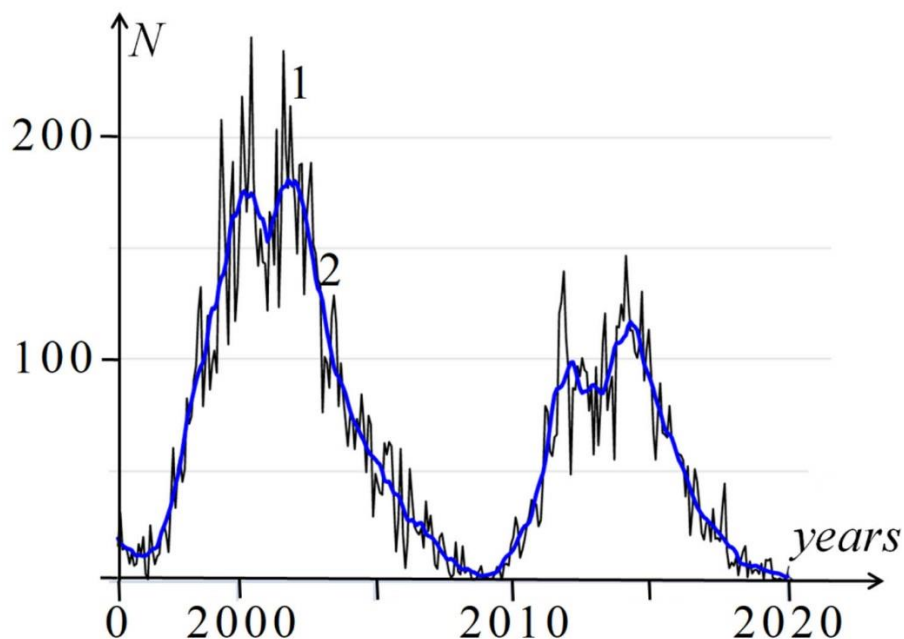


Рис. 1. 23-й и 24-й циклы солнечной активности: 1 – среднемесячное число солнечных пятен; 2 – сглаженная кривая.

Как видно на Рис. 1, солнечная активность в 24-м цикле была почти вдвое меньше, чем в 23-м.

Как известно, содержание и динамика распределения озона зависят от баланса скоростей его фотохимического образования, зависящего от солнечного

излучения, потерь в деструктивных процессах с участием соединений водорода (H , OH , HO_2), азота (N , NO , NO_2) и хлора (Cl , ClO), а также от крупномасштабного переноса озона воздушными массами [4,6,7]. Динамические процессы влияют и на распределение температуры, а повышение температуры ускоряет реакции разрушения озона [7]. Согласно моделированию [8], отклик озона в верхних слоях стратосферы на изменения температуры будет увеличиваться по мере снижения содержания хлора. Эти процессы приводят к отрицательной корреляции между концентрацией озона и температурой в верхней стратосфере.

Имеются также и экспериментальные исследования роли температуры и солнечной активности в формировании высотного распределения озона в различных географических районах.

В [5] представлены результаты многопараметрического регрессионного анализа колебаний среднемесячных значений профиля озона в течение примерно 1,5 циклов солнечной активности, учитывающего годовые, полугодовые и квазидвухлетние колебания, Эль-Ниньо-Южное колебание и цикл солнечной активности (на основе нормализованного временного ряда солнечного радиопотока на волне 10,7 см). Оказалось, что для компоненты, связанной с солнечным циклом, в нижних слоях стратосферы наблюдалась сильная пиковая амплитуда колебаний озона, составляющая приблизительно 5 %.

Основываясь на спутниковых измерениях содержания озона в средних слоях атмосферы, несколько научных групп исследовали корреляции между озоном, температурой и солнечной активностью. В работе [9] было обнаружено, что среднезональные колебания озона и температуры, измеренные прибором SABER на борту спутника TIMED в период с 2002 по 2005 г. в диапазоне широт от 48N до 48S и на высотах от 20 до 100 км, положительно коррелировали примерно ниже 30 км и выше 80 км, и были отрицательно коррелированы примерно между 30 и 80 км. Позже эта группа представила данные о десятилетних трендах озона и температуры и их корреляции за более длительный период с 2002 по 2012 г. [10], а также об откликах озона и температуры на

колебания солнечной активности с 2002 по 2014 г. [11]. Они обнаружили, что в средней стратосфере и верхней мезосфере отклик озона на солнечный цикл был относительно сильным [12].

Выполненный в [13] анализ за период 1979-2020 гг. показал наличие корреляции между температурой в нижних слоях стратосферы и общим содержанием озона в атмосферном столбе. В этой статье отмечалось, что вариации содержания озона в верхней тропосфере и нижней стратосфере могут влиять на температуру в средней и верхней стратосфере из-за восходящего длинноволнового излучения. В работе [8] также была обнаружена корреляция содержания озона и температуры в нижних слоях тропической стратосферы.

В работе [14] была изучена частотная зависимость уровня корреляции озона и температуры за периоды времени от 2 дней до 5 лет с использованием данных, полученных прибором Microwave Limb Sounder (MLS) на борту спутника Aura в 2004-2021 гг., и для этих периодов были определены соответствующие высотные области корреляции и антикорреляции между озоном и температурой.

Приведенные выше результаты обнаруженных озон-температурных корреляций и корреляций содержания озона с солнечной активностью стимулировали нас продолжить наше исследование, включив в анализ статистических параметров температуру, чтобы исследовать совместные озон-температурные корреляционные и ковариационные функции и сравнить полученные за две декады статистические параметры озона и температуры на основе тех же ансамблей профилей озона, полученных в ФИАН и ансамблей соответствующих профилей температуры из имеющихся баз данных.

Учитывая, что основная специфика, связанная с различиями в двух декадах, относится к зимним месяцам, в отличие от нашей статьи [2], где приведены среднемесячные и среднедекадные статистические параметры озона, в данной статье мы представляем сравнение среднесезонных (осредненных по среднемесячным профилям каждого из сезонов) параметров за 1996-2006 и 2007-2017 гг., чтобы с большей статистической значимостью

выявить специфику и отличия зимнего сезона от переходных осеннего и весеннего сезонов, а также определить междекадные тренды.

Первые результаты этих исследований были опубликованы в трудах конференции [1], где для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. были представлены высотные распределения среднесезонных совместных озон-температурных коэффициентов корреляции, а также выполнено сравнение среднесезонных профилей озона, температуры и их среднеквадратичных вариаций. В данной работе мы представляем расширенные и детализированные результаты исследования и дополняем их рассмотрением более информационно содержательных распределений совместных озон-температурных межвысотных корреляционных и ковариационных функций, а также сравнением распределений и междекадных изменений других статистических параметров озона и температуры: среднесезонных структурных автокорреляционных и автоковариационных функций, их частотных спектров, а также межвысотных корреляционных и ковариационных функций.

1. Методы измерений и ансамбли данных

Анализ включает данные за осенние, зимние и весенние месяцы 1996-2017 гг. (2096 вертикальных профилей относительного содержания (объемного отношения смеси) озона и соответствующие температурные профили). Профили озона были получены из спектров яркостных температур теплового излучения атмосферы на частотах вращательной спектральной линии озона $10_{0,10}$ – $10_{1,9}$ с центральной частотой 142,175 ГГц (длина волны 2,1 мм) [15]. Наблюдения проводились в Москве в ФИАН (55,70° с.ш, 37,57° в.д., 180 м над уровнем моря). Микроволновый спектрометр, методы наблюдения и примеры спектров подробно рассмотрены в [2,15,16].

Все профили содержания озона, использованные в статистическом анализе этого исследования, были получены из микроволновых спектров, измеренных в дневное время. Продолжительность наблюдений составляла 1-3 часа, среднее

количество дней наблюдений составляло 15-20 в месяц (как правило, все рабочие дни, за исключением дней с плохой погодой) [15,16].

Профили объемного отношения смеси озона были получены из измеренных спектров яркостной температуры на основе решения соответствующего нелинейного интегрального уравнения 1-го рода с использованием итерационного алгоритма, который был разработан в [17] на основе метода Тихонова [18] и во всех деталях описан в [2,19]. Алгоритм был успешно применен в многолетних исследованиях озоносферы в ФИАН [2,3,19-24].

Выполненный в этих статьях детальный анализ ошибок восстановленных профилей озона, основанный на численном моделировании с использованием ансамблей профилей, показал, что стандартные ошибки полученных профилей были очень стабильными и практически не зависели от вариаций профилей озона и их сезонных статистических ансамблей, составляя 0,1-0,2 ppm в широком диапазоне высот h от 15 до 80 км, что составляет 2-5 % от среднего значения объемного отношения смеси озона в диапазоне высот 20-50 км [2]. Принимая во внимание возможные неточности профилей температуры и давления в ядре решаемого интегрального уравнения, а также ошибки калибровки и искажения, связанные с аппаратной функцией каналов спектрометра, фактическая погрешность восстановления могла увеличиться на 1-2 %.

В результате, на высотах 20-50 км суммарная ошибка восстановления профилей озона не превышала 5-7 %. Ниже и выше этого диапазона высот погрешности постепенно увеличивались до 20-30 %. В зависимости от конкретного профиля содержания озона измерения являются информативными в диапазоне от 15-20 до 60-80 км. В этом исследовании для статистического анализа мы выбрали диапазон высот от 15 до 70 км. Начиная с 2005 г., были проведены многочисленные сравнения профилей озона ФИАН с профилями, полученными прибором MLS Aura [25] над Москвой, которые в пределах ошибок измерений обоих приборов показали совпадение профилей озона как для спокойных, так и для возмущенных состояний стратосферы [23,26].

При восстановлении профилей озона из микроволновых спектров использовались вертикальные профили температуры и давления из базы данных British Atmospheric Data Centre (Британского центра атмосферных данных, BADC) [27]. Иногда также использовались данные метеорологических радиозондов Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО, Долгопрудный, Московская обл.) [28].

В 1996-2009 гг. профили температуры BADC были доступны в диапазоне высот от 0 до 52-66 км; после 10 ноября 2009 г. – от 0 до 73-80 км. Для восстановления профилей озона в мезосфере температурные точки из BADC дополнялись температурой 191 К на высоте 100 км из модели CIRA-86 [29], а затем выполнялась сплайн-интерполяция температурных профилей. Таким образом, в первом десятилетии 1996-2006 гг. температурные профили на высотах 60-70 км включали в себя ошибки интерполяции, которые могли достигать 5-10 К и даже более. В течение большей части второго десятилетия 2007-2017 гг. температурные профили BADC на высотах 60-70 км были свободны от этих ошибок. Погрешности радиозондовых измерений температуры в диапазоне высот 0-30 км составляют менее 1 К [28,30]. Данные, представленные в [25] и основанные на сравнении результатов спутника Aura с другими базами данных, дают оценки погрешности 1 К в диапазоне высот 10-80 км и 2,3 К в диапазоне 80-92 км. В этой работе для статистического анализа мы брали те же температурные профили BADC, которые использовались ранее для восстановления профилей озона.

Ансамбли данных по озону включают 1169 профилей за декаду 1996-2006 гг. и 927 профилей за декаду 2007-2017 гг. Достоинства этих данных состоят в том, что они были получены в одном и том же месте с помощью одного и того же прибора и примерно в одно и то же время суток, а также в том, что период измерений почти полностью охватывал 23-й и 24-й циклы солнечной активности, что позволило проанализировать долгосрочные изменения и их возможную корреляцию с существенным падением солнечной активности в 24-м цикле. Для статистического анализа были выделены сезонные ансамбли данных,

включающие профили озона и температуры за три месяца осеннего, зимнего и весеннего сезонов каждой из двух декад. Летние данные не были включены в анализ из-за незначительных вариаций содержания озона.

2. Статистический анализ

Для описанных выше ансамблей профилей озона и температуры были вычислены среднемесячные статистические параметры полученные путем усреднения значений для каждого дня каждого из 9 месяцев за 11 лет декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.: средние вертикальные профили объемного отношения смеси (содержания) озона $\langle U(h) \rangle$ и температуры $\langle T(h) \rangle$, профили их дисперсий:

$$\sigma_U^2(h) = \langle [U(h) - \langle U(h) \rangle]^2 \rangle, \quad \sigma_T^2(h) = \langle [T(h) - \langle T(h) \rangle]^2 \rangle \quad (1)$$

и соответствующих среднеквадратичных отклонений (вариаций) $\sigma_U(h)$, $\sigma_T(h)$, межвысотные совместные озон-температурные ковариационные и корреляционные функции:

$$B_{UT}(h_U, h_T) = \langle [U(h_U) - \langle U(h_U) \rangle][T(h_T) - \langle T(h_T) \rangle] \rangle, \quad (2)$$

$$R_{UT}(h_U, h_T) = B_{UT}(h_U, h_T) / \sqrt{B_{UU}(h_U, h_U) B_{TT}(h_T, h_T)},$$

структурные функции (профили) озона и температуры:

$$St_U(h, \tau) = \langle [U(h, t) - \langle U(h, t + \tau) \rangle]^2 \rangle, \quad (3)$$

$$St_T(h, \tau) = \langle [T(h, t) - \langle T(h, t + \tau) \rangle]^2 \rangle,$$

их автоковариационные функции:

$$B_{U_t}(h, \tau) = \langle [U(h, t) - \langle U(h) \rangle][U(h, t + \tau) - \langle U(h) \rangle] \rangle, \quad (4)$$

$$B_{T_t}(h, \tau) = \langle [T(h, t) - \langle T(h) \rangle][T(h, t + \tau) - \langle T(h) \rangle] \rangle,$$

и автокорреляционные функции:

$$R_{U_t}(h, \tau) = B_{U_t}(h, \tau) / \sigma_U^2(h) = B_{U_t}(h, \tau) / B_{UU}(h, h), \quad (5)$$

$$R_{T_t}(h, \tau) = B_{T_t}(h, \tau) / \sigma_T^2(h) = B_{T_t}(h, \tau) / B_{TT}(h, h),$$

а также спектры мощности ковариаций озона и температуры:

$$S_U(h, f) = \int B_{U_t}(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau, \quad (6)$$

$$S_T(h, f) = \int B_{Tt}(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau,$$

межвысотные ковариационные функции озона и температуры:

$$B_{UU}(h_1, h_2) = \langle [U(h_1) - \langle U(h_1) \rangle][U(h_2) - \langle U(h_2) \rangle] \rangle, \quad (7)$$

$$B_{TT}(h_1, h_2) = \langle [T(h_1) - \langle T(h_1) \rangle][T(h_2) - \langle T(h_2) \rangle] \rangle,$$

и соответствующие корреляционные функции:

$$R_{UU}(h_1, h_2) = B_{UU}(h_1, h_2) / \sqrt{B_{UU}(h_1, h_1)B_{UU}(h_2, h_2)}, \quad (8)$$

$$R_{TT}(h_1, h_2) = B_{TT}(h_1, h_2) / \sqrt{B_{TT}(h_1, h_1)B_{TT}(h_2, h_2)},$$

В приведенных формулах τ обозначает временной сдвиг, а f – частоту.

Среднесезонные параметры $X^{\text{осень, зима, весна}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 X_i$ были получены путем

усреднения соответствующих среднемесячных параметров X_i по трем месяцам соответствующего сезона для каждой из декад 1996-2006 и 2007-2007 гг.

Профили среднесезонных ковариационных и корреляционных коэффициентов $B_{UT}(h, h)$, $R_{UT}(h, h)$ представлены в [1] (Fig. 4).

Оценки показывают, что выборочные ошибки в среднемесячных вариациях профилей озона и температуры изменяются относительно соответствующих средних профилей примерно с 7 % в холодные месяцы (ноябрь – март) до 17 % в более теплые осенние и весенние месяцы. Выборочные погрешности при определении среднемесячных значений содержания озона находились в пределах 0,9-1,8 %. В статье [2] мы представили подробное исследование выборочных ошибок в статистических параметрах профиля озонового слоя, включая вклад ошибок восстановления профиля озона по радиометрическим данным. Это исследование показало, что ошибки восстановления озона приводят к относительно небольшому увеличению оценок его среднеквадратичных отклонений и ковариационных функций. Поэтому этот фактор в их анализе не учитывался.

Выборочные ошибки среднемесячных температурных профилей зависят главным образом от высоты и варьируются примерно от 0,3-0,5 К в тропосфере (0,6-0,8 К для сентября и мая) до 2-3 К в верхних слоях. Соответственно,

выборочные ошибки среднесезонных параметров уменьшаются примерно в 1,7 раза. Важно отметить, что сезонная нестационарность озона и температуры способствует увеличению их вариаций и ошибок в определении средних значений, особенно в переходные осенние и весенние месяцы.

3. Результаты статистического анализа

На Рис. 2 показаны использованные в анализе ансамбли высотных профилей озона и температуры в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, полученные для трех сезонов анализа двух 11-летних декад наблюдений.

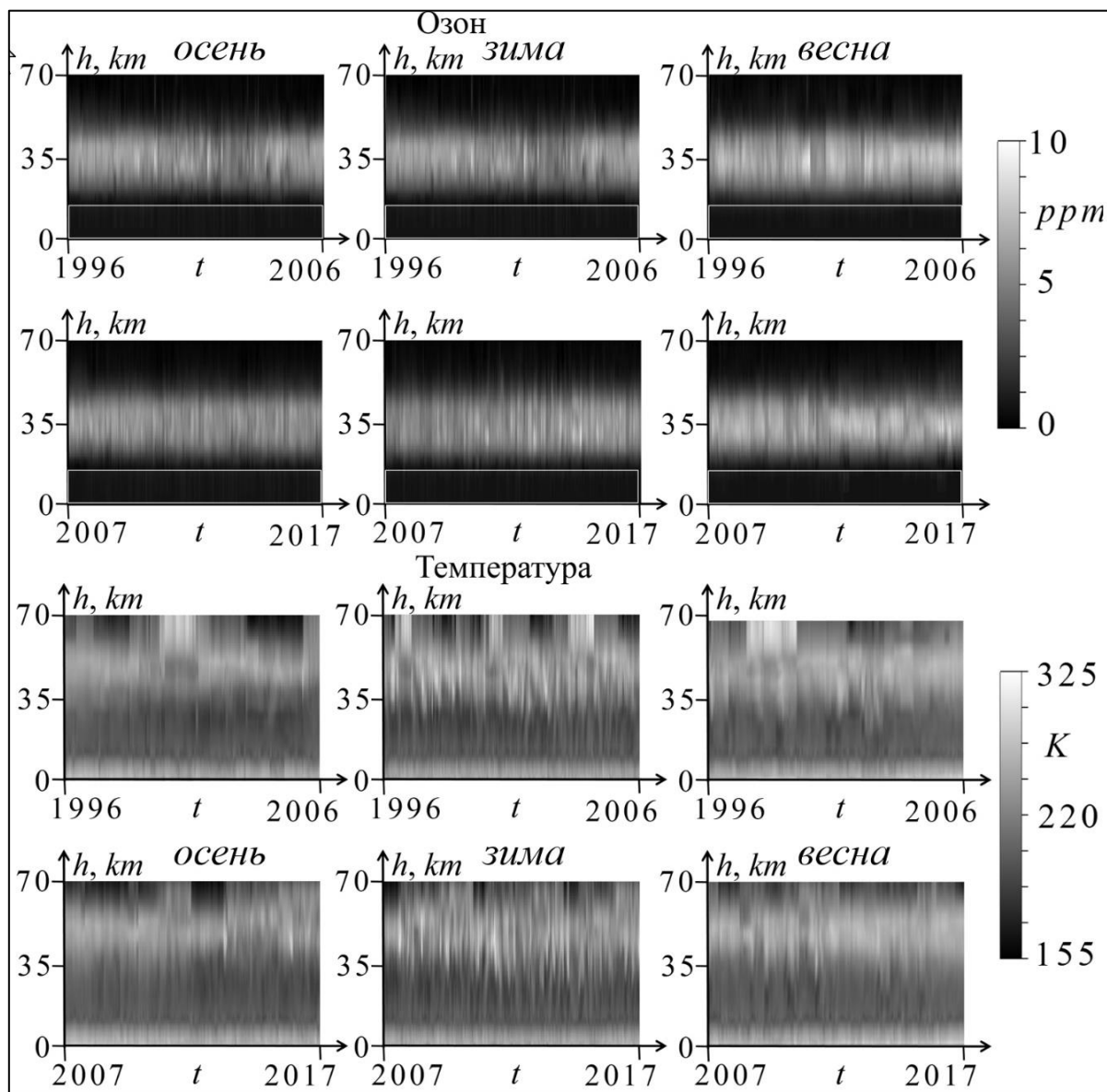


Рис. 2. Ансамбли осенних, зимних и весенних профилей озона и температуры над Москвой в декадах 1996-2006 и 2007-2017 гг. Малоинформативные области профилей озона выделены белым прямоугольником.

3.1. Среднесезонные профили и их вариации

Соответствующие среднесезонные профили содержания озона и температуры, а также профили их среднеквадратичных вариаций (1) были представлены нами в [1]. Поэтому в данной статье на Рис. 3 показаны только междекадные изменения (разности) среднесезонных профилей озона и температуры, а также разности их вариаций в более наглядной форме диаграмм в градациях цвета. Кроме того, ниже приведено значительно более детальное, чем в [1], сравнение этих профилей, их вариаций и изменений этих параметров между декадами 1996-2006 и 2007-2017 гг.

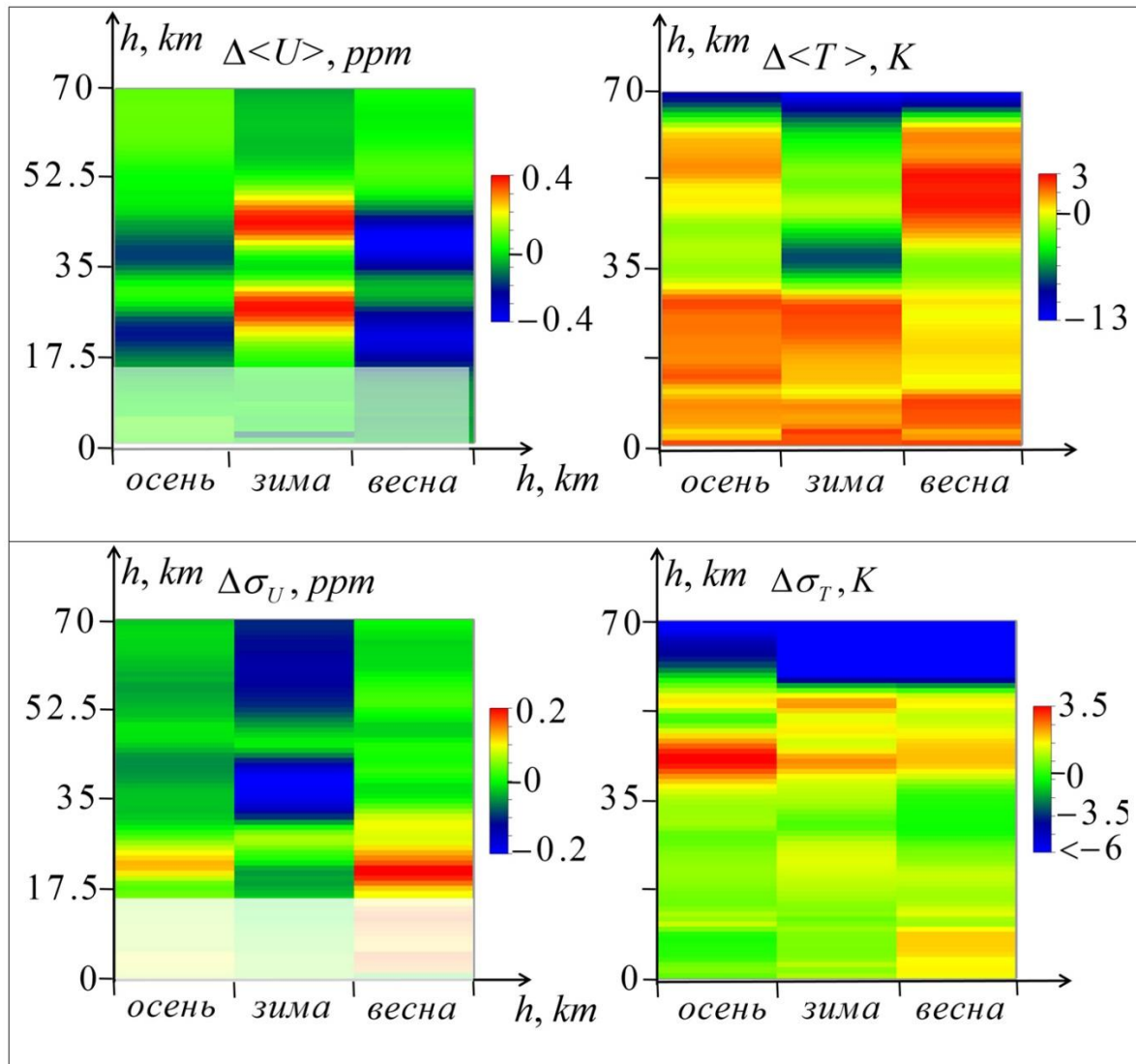


Рис. 3. Верхний ряд – междекадное (2007-2017) – (1996-2006) изменение среднесезонных профилей озона (слева) и температуры (справа); нижний ряд – междекадное изменение среднесезонных вариаций профилей озона (слева) и температуры (справа).

На Рис. 3 видно, что междекадные изменения для зимнего сезона значительно отличаются от изменений в переходные осенний и весенний сезоны, между которыми, наоборот, есть много сходства.

В зимних среднесезонных профилях содержания озона $\langle U \rangle$ в декаде 2007-2017 гг. (с пониженной солнечной активностью) наблюдается прирост содержания озона в слоях 15-33 км и 38-52 км с максимальными значениями до $\Delta \langle U \rangle = 0,39$ ppmt (около 8 %) на высотах 26 и 44 км соответственно – то есть выше и ниже высоты озонового максимума (около 35 км), где наблюдается незначительное снижение около 0.03 ppmt. Напротив, в осенних и весенних профилях видно снижение среднего содержания озона с двумя минимумами - 0,22 и -0,18 ppmt (11 и 4 %) на высотах 20 и 37 км осенью и -0,35 и -0,41 ppmt (14 и 6 %) на 21 и 40 км весной. Выше 54 км зимой наблюдается небольшое (до 10-15 %) снижение содержания озона, а осенью и весной – преимущественно небольшой рост.

Среднесезонные вариации содержания озона $\langle \sigma_U \rangle$ в зимний сезон в основной части озонового слоя на высотах 15-55 км, представленные на Fig. 3 в [1], значительно превосходят осенние и весенние вариации. В профилях среднесезонных вариаций содержания озона имеет место их снижение в декаде 2007-2017 гг. выше 29 км осенью и зимой и выше 34 км весной, с особенно значительным падением $\Delta \sigma_U = -0,23$ ppmt (28 %) зимой на высоте 38-39 км, которое отображает обнаруженное в [2] падение среднемесячных значений вариаций для зимних месяцев.

В осеннем сезоне максимальное падение вариаций составляет -0,015 ppmt (3 %) на 42 км, а в весеннем сезоне оно еще менее значимое. Выше 50 км в разностях зимних и осенних вариаций наблюдаются вторые минимумы: -0,15 ppmt на 59 км (39 %) зимой и -0,07 ppmt (29 %) на высоте 56 км осенью. На высотах ниже 29 км в зимнем сезоне имеется прирост вариаций во второй декаде на 0,05 ppmt (5 %) на 27 км и значительное (по сравнению с небольшим средним значением вариаций на этой высоте) падение -0,07 ppmt (47 %) на 20 км. В осенний и весенний сезоны на этих высотах, также во второй декаде,

наблюдается значительный прирост вариаций с максимумами 0,15 ppm на 22 км осенью и 0,19 ppm на 20 км весной, сопоставимыми со средними значениями вариаций в первой декаде, небольшими на этих высотах.

В среднесезонных профилях температуры $\langle T(h) \rangle$ между 30 и 49 км в декаде 2007-2017 гг. наблюдается наиболее значительный спад в зимнем сезоне – до $\Delta \langle T(h) \rangle = -8,4$ К на высоте 37 км, который перекрывает область высот 34-37 км, где наблюдается понижение в среднесезонном профиле озона, расположенное между двумя областями его сильного повышения (см выше). Это падение температуры совпадает по высоте с наиболее значительным падением средnezимних вариаций озона в этой декаде. Аналогичные высотные соответствия максимумов спада температуры (-2,8 К на 42 км в осеннем и -3,2 К на 35 км в весеннем сезонах) с максимумами спада среднесезонного содержания озона и его вариаций имеют место в осеннем и весеннем сезонах. Выше 60 км наблюдается очень значительное уменьшение температур во второй декаде, которое может содержать существенные ошибки, связанные с интерполяцией профилей температуры на этих высотах в первой декаде.

Имеется и сезонная специфика; повышение среднесезонной температуры во второй декаде до $\Delta \langle T \rangle = 2,7$ К на высотах 41-62 км весной и небольшое (до 0,7К) ее повышение на 53-61 км осенью. Также осенью и зимой наблюдается повышение температуры до 2 К на высотах от 12 до 30 км. На высотах 9-11 км изменения температуры незначительны, а на высотах 2-4 км осенью и зимой температура во второй декаде выше примерно на 1 К, а весной – на 1,5-2 К. Поверхностная температура выросла во второй декаде на 2 К во всех трех сезонах.

Среднесезонные вариации температуры $\langle \sigma_T \rangle$ в зимний сезон в основной части озонового слоя на высотах 15-55 км, значительно превосходят осенние и весенние вариации – также, как и рассмотренные выше среднесезонные вариации озона (Fig. 3 в [1]). В первой декаде они возрастают от 5 К на 15 км до 16,7 К на 38 км (около максимума озонового слоя), имеют второй слабо выраженный максимум 15,7 К на 44 км и снижаются до локального минимума

10,4 К на 54 км. Во второй декаде вариации возрастают от 5,1 К на 15 км до 17,9 К на 41 км и снижаются до локального минимума 12,3 К на 55 км. Выше 55 км в первой декаде наблюдается резкий рост вариаций температуры до 35 К на 70 км; во второй декаде этот рост продолжается до локального максимума 20 К на 67 км (Fig. 3 в [1]). Возможно, больший рост вариаций с высотой в первой декаде может быть связан с ошибками интерполяции.

В междекадных изменениях вариаций зимой на высотах 15-55 км (см. Рис. 3) в основном наблюдается прирост вариаций температуры $\Delta < \sigma_T > :$ от 0,1 К на 15 км до 0,8 К на 23 км. Далее на интервале высот 28-33 км во второй декаде наблюдается небольшое снижение вариаций с минимальным значением - 0,5 К на 33 км, а выше – снова прирост, который достигает 1,7 К на 42 км и составляет 0,8-2 К от 44 до 55 км. Заметим, что в этой области прироста вариаций температуры имеет место значительный спад вариаций содержания озона (см. выше). Выше 55 км, где во второй декаде имеется прирост вариаций на 2 К, км наблюдается быстрое уменьшение роста, переходящее в спад до -17 К на 70 км, который, возможно, отражает уменьшение вклада ошибок интерполяции температуры в вариации в этой декаде.

Снова обращаясь к Fig. 3 из работы [1], можно видеть, что вариации температуры в осенний и весенний период схожи. В первой декаде в слое 15-55 км они возрастают от 3,7 К на 15 км до 7,3 К осенью и 6,1 К весной, когда на высоте 36 км имелся локальный максимум 8,4 К. Выше 55 км, так же, как и в зимний сезон, происходит резкое возрастание вариаций температуры до 25,7 К на 70 км осенью и до 22,8 К весной, что значительно ниже, чем в зимний сезон. Во второй декаде среднесезонные вариации возрастают от 3,1 К осенью и 3,7 К весной на 15 км до 6,7 К на 51 км с локальными максимумами 9,1 К на 45 км осенью и 8,2 К на 40 км весной. Выше 55 км осенью происходит возрастание вариаций температуры до максимумов 20,3 К на 67 км, а весной это возрастание после локального минимума 5,5 К на 59 км доходит до 14,2 К на 69 км, что несколько ниже, чем в зимний сезон (Fig. 3 в [1]).

Из сравнения разности вариаций температуры $\Delta < \sigma_T >$ в двух декадах (см. выше на Рис. 3) можно видеть, что в осеннем сезоне на высотах 15-55 км от 15 до 34 км наблюдаются близкие к нулевым значения, далее виден слой повышенных значений на высотах до 48 км с максимальным приростом 3,5 К на 42 км с последующим переходом к спаду на высотах от 49 до 52 км до минимума -0,65 К на 50 км. Далее, после небольшого повышения до 1,2 К на высоте 54 км, наблюдается глубокий спад до -8,4 К на 70 км.

В зимнем сезоне на высотах 15-36 км наблюдается слабый (до около 1 К) прирост вариаций, затем небольшое повышение с локальными максимумами около 2 К на высотах 42 и 54 км с последующим глубоким спадом до -27 К на 70 км.

В весеннем сезоне на высотах 15-33 км во наблюдается небольшой (до 0,6 К) прирост вариаций $\Delta < \sigma_T >$ с последующим уменьшением и переходом к спаду вариаций на высотах от 23 до 38 км до около -1 К на высотах 30-36 км. Далее на интервале 40-55 км снова наблюдается рост разности вариаций с локальными максимумами 1,7 К на 42 км и 1,2 К на 54 км (на высотах аналогичных максимумов осеннего и зимнего сезонов). Выше 55 км наблюдается быстрое уменьшение роста, переходящее в спад до локального минимума -8,7 К на 70 км.

В диапазоне высот 0-15 км профили вариаций температуры $< \sigma_T >$ имеют сходные распределения в различные сезоны и декады (см. Figs. 3b, 3d, 3f в [1]). В первой декаде в осеннем сезоне имеются максимумы 4,9 К на 0 км, 5,6 К на 6-7 км, 4,7 К на 12 км и минимумы - 4,6 К на 1 км, 2,8 К на 10 км, 3,3 К на 15 км. Во второй декаде на высотах от 0 до 7 км вариации практически постоянны (около 4,5 К), далее наблюдается их снижение до минимума 3,4 К на 10 км, подъем до максимума 5,0 К на 12 км и спад до 3,4 К на 15 км (Fig. 3 в [1]). В осенний сезон наблюдалось междекадное уменьшение вариаций (см. выше на Рис. 3) на высотах 0-9 км с минимумом разницы $\Delta < \sigma_T > = -1,0$ К на 7 км, ее увеличение до 0,65 К на 10-12 км и незначительное снижение до -0,2 К на 15 км.

В первой декаде в зимнем сезоне наблюдаются максимумы $\langle \sigma_T \rangle = 6,2$ К на 0 км, 5,8 К на 5 км, 5,7 К на 12 км и минимумы 5,0 К на 2 км, 3,1 К на 9 км, 4,9 К на 15 км. Во второй декаде имеются максимумы 6,5 К на 0 км, 5,7 на 5 км, 5,8 К на 12 км и минимумы 5,1 К на 1 км, 3,2 К на 9 км, 5,0 К на 15 км (Fig. 3 в [1]). Междекадные изменения вариаций в зимний сезон не превышали 0,5 К (Рис. 3).

В первой декаде в весеннем сезоне наблюдались максимумы $\langle \sigma_T \rangle = 4,5$ К на 0 км, 4,6 К на 4-5 км, 4,9 К на 11 км, и минимумы 3,2 К на 1 км, 2,6 К на 9 км, 3,4 К на 15 км. Во второй декаде имелись максимумы 5,6 К на 0 км, 6,1 К на 5 км, 5,7 К на 12 км и минимумы 4,3 К на 1-2 км, 3,7 К на 9 км, 3,8 К на 15 км (Fig. 3 в [1]). В весенний сезон во второй декаде на Рис. 3 наблюдался прирост вариаций от $\Delta \langle \sigma_T \rangle = 1,0$ К на 0 км до максимума 1,5 К на 5-8 км, уменьшение роста до минимального 0,2 К на 10 км, максимум 0,9 К на 12 км и снова уменьшение роста до 0,3 К на 15 км.

3.2. Озон-температурные ковариационные и корреляционные функции

Исследования сезонных статистических параметров, представленные на конференции [1], включали также высотные распределения среднесезонных озон-температурных коэффициентов корреляции. В данной работе мы рассматриваем более информативные межвысотные распределения совместных озон-температурных ковариационных и корреляционных функций (2).

На Рис. 4 представлены среднесезонные межвысотные совместные озон-температурные корреляционные и ковариационные функции (2) для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. Как можно видеть на рисунке, представленные распределения имеют много общего – области наибольшей корреляции озона с температурой наблюдаются для температуры на высотах ниже 35 км, а области наибольшей антикорреляции – выше этой высоты. Также, в основном около этой высоты происходят переходы от областей положительной корреляции к областям с отрицательными значениями – что близко к оценкам высот перехода к антикорреляции и антиковариации в среднесезонных профилях их

коэффициентов, представленных нами в [1]. Однако высоты h_u, h_t в экстремумах корреляций и антикорреляций на Рис. 4 не совпадают – что демонстрирует большую информационную содержательность двумерных корреляционных функций по сравнению с одномерными профилями коэффициентов корреляции в [1].

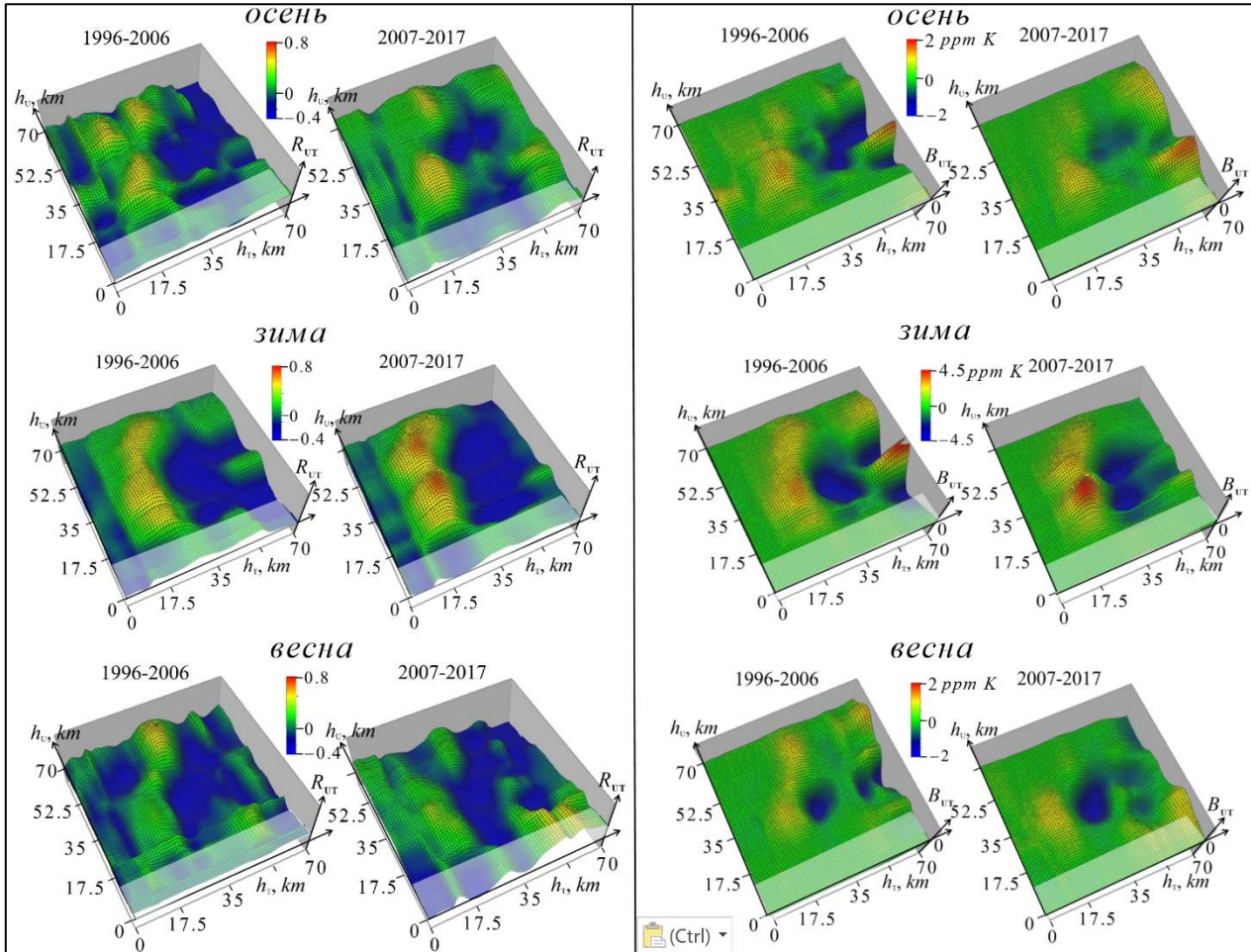


Рис. 4. Слева – среднесезонные межвысотные совместные озон-температурные совместные корреляционные функции для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие совместные ковариационные функции в $\text{ppm} \cdot \text{K}$.
Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

Общей особенностью распределений на Рис. 4 является наличие максимумов корреляции и ковариации между содержанием озона на высотах около 29 км и температурами на высотах около 24 км. Также почти во всех распределениях можно видеть второй максимум между озоном высотами примерно от 45 до 60 км и температурами около 34 км.

В зимний период максимумы корреляции оказываются существенно выше, чем осенью и весной; при этом они заметно возрастают в декаде 2007-2017 гг. Так,

в осенний сезон

$$R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 38, h_T = 23) = 0,50, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 38, h_T = 24) = 0,52,$$

$$\text{зимой } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 27, h_T = 22) = 0,60, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 28, h_T = 24) = 0,72,$$

$$\text{весной } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 28, h_T = 20) = 0,24, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 30, h_T = 15) = 0,34.$$

Наибольшие вторичные максимумы корреляции:

$$\text{осенью } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 48, h_T = 19) = 0,45, \quad R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 54, h_T = 34) = 0,49,$$

$$\text{зимой } R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 47, h_T = 24) = 0,70,$$

$$\text{весной } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 50, h_T = 36) = 0,52.$$

Области антикорреляции менее упорядочены, а ее максимумы относительно невелики:

в осенний сезон

$$R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 18, h_T = 40) = -0,43, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 43, h_T = 51) = -0,48,$$

$$\text{зимой } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 34, h_T = 43) = -0,36, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 47, h_T = 45) = -0,48,$$

$$\text{весной } R_{UT}^{1996-2006}(h_U = 34, h_T = 36) = -0,38, \quad R_{UT}^{2007-2017}(h_U = 36, h_T = 37) = -0,37.$$

Границы между областями положительной и отрицательной корреляции на Рис. 4 совпадают с соответствующими границами для ковариационных функций, однако из-за различия цветовых шкал они выглядят по-разному для этих параметров. Для корреляционных функций переход через границу близко соотносится с переходом в цветовой шкале от зеленого к синему, поэтому они лучше различимы. Благодаря нормировке детализация структуры корреляционных функций также отчетлива в областях как с малыми вариациями параметров, так и с большими.

Максимумы ковариации и антиковариации в зимний сезон оказались в два и более раз больше, чем осенью и зимой: $B_{UT}^{1996-2006}(h_U = 33, h_T = 25) = 3,4 \text{ ppm K}$, $B_{UT}^{1996-2006}(h_U = 31, h_T = 64) = 3,8 \text{ ppm K}$, $B_{UT}^{2007-2017}(h_U = 28, h_T = 25) = 4,3 \text{ ppm K}$,

$$B_{UT}^{1996-2006}(h_U = 34, h_T = 44) = -4,8 \text{ ppm K}, \quad B_{UT}^{2007-2017}(h_U = 44, h_T = 45) = -4,3 \text{ ppm K},$$

$$B_{UT}^{2007-2017}(h_U = 30, h_T = 43) = -3,8 \text{ ppm K}.$$

Ниже представлено сравнение статистических параметров озона и температуры как между собой, так и между их междекадными изменениями.

3.3. Структурные функции

На Рис. 5 показаны среднесезонные структурные функции (3) вариаций озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

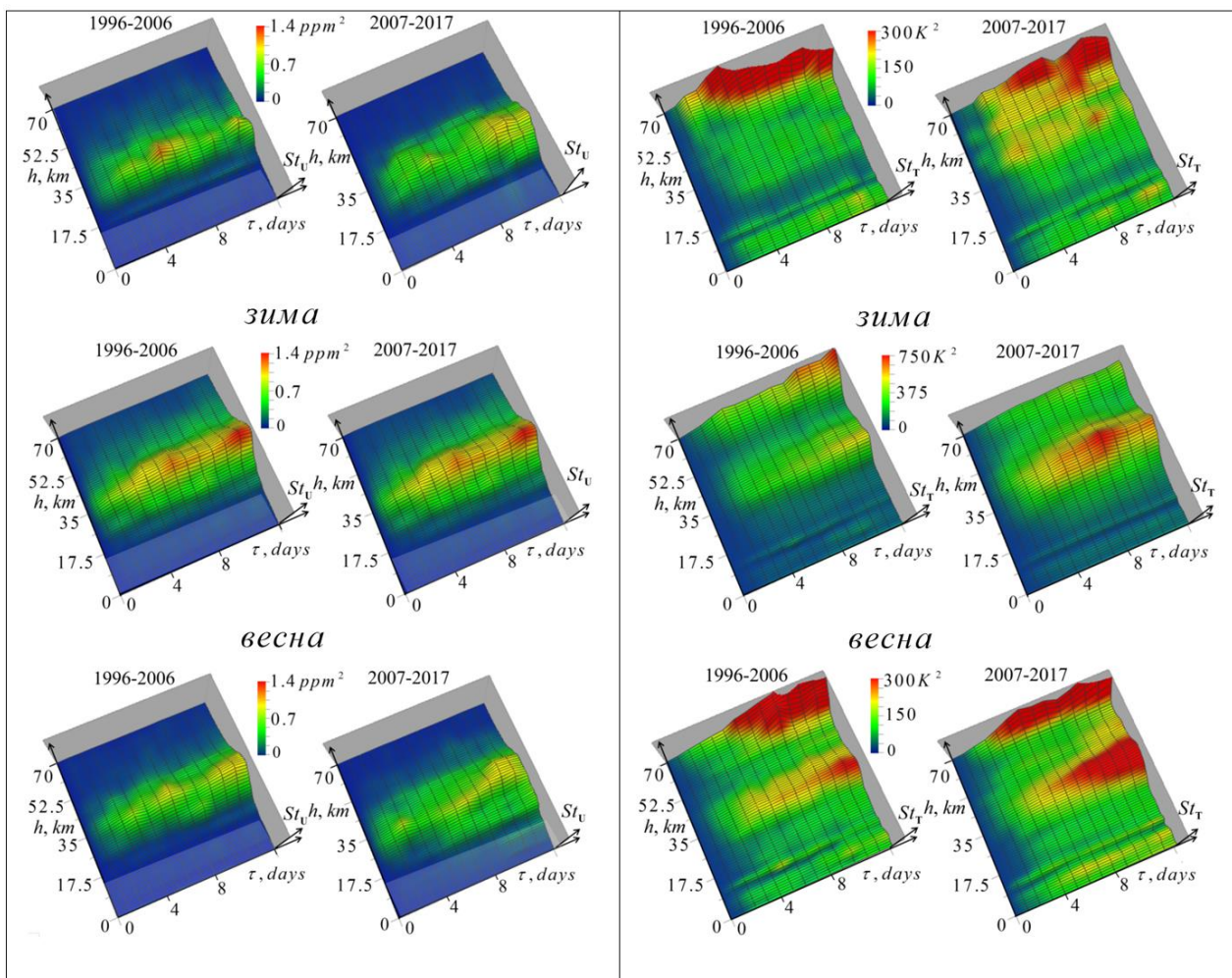


Рис. 5. Слева – среднесезонные структурные функции вариаций озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие структурные функции вариаций температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

Можно видеть, что структурные функции вариаций озона достигают насыщения за 4-7 дней. Далее имеет место некоторый спад, а на 10-12-й день

можно видеть вторичный максимум, возможно (особенно в весенний сезон) связанный с нестационарностью, или являющийся проявлением периодического процесса.

Структурные функции температуры в основной области озонового слоя (15-55 км) насыщаются за 3-4 дня для осеннего сезона, зимой – за 10-13 дней. Весной в декаде 1996-2007 гг. насыщение происходит за 13 дней, а в декаде 2007-2017 гг. структурная функция не достигает насыщения, вероятно из-за нестационарности, которая для температуры может проявляться на любых временных масштабах, и особенно, в таком переходном сезоне, как весна. Выше 55 км, где структурные функции температуры насыщаются за 3-7 дней, нестационарность не проявляется.

3.4. Автоковариационные функции

На Рис. 6 представлены среднесезонные автоковариационные функции (4) вариаций озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. На рисунке видно, что в зимний сезон значения ковариационных функций и озона, и температуры оказываются значительно выше, чем осенью и весной. При этом, для автоковариационных функций озона в интервале высот 30-46 км имеет место существенное снижение в декаде 2007-2017 гг. с пониженной солнечной активностью (см. Рис. 1) по сравнению с декадой 1996-2006 гг., совпадающее со значительным снижением вариаций профилей озона, а у автоковариационных функций температуры, наоборот, во второй декаде наблюдается значительный рост при отсутствии заметных изменений вариаций профилей температуры.

Автоковариационные функции озона спадают с характерным временем около 3 дней. На этом временном интервале наибольшие значения ковариаций в осенний сезон наблюдались на высотах 31-32 км, зимой на 35 км в декаде 1996-2006 гг. и на 29 км в 2007-2017 гг., а весной – соответственно на 32 и 35 км.

На Рис. 6 видны протяженные слои с небольшими значениями ковариации озона, часто с локальными максимумами, указывающими на наличие

периодических процессов. Имеются также небольшие области с незначительной отрицательной ковариацией.

Автоковариационные функции температуры на высотах основной части озонового слоя (15-55 км) также спадают с характерным временем около 3 дней. На этом временном интервале в указанной выше области высот наибольшие значения ковариаций температуры в осенний сезон наблюдались на высотах 39 км в декаде 1996-2006 гг., и 46 км в 2007-2017 гг., зимой на 38 км и 41 км, а весной на 36 и 41 км. Как можно видеть на Рис. 6, высоты наибольших температурных ковариаций во второй декаде существенно возросли.

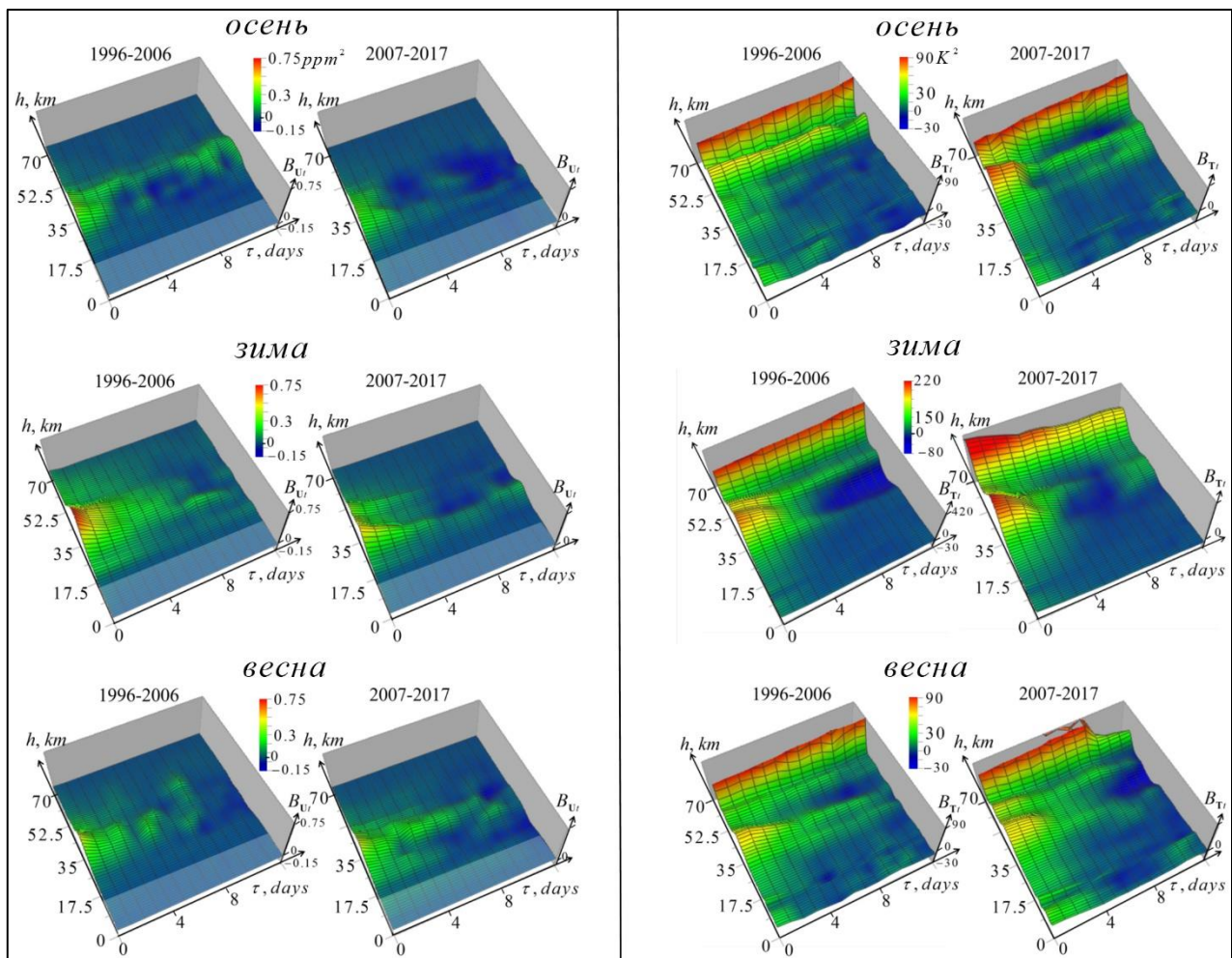


Рис. 6. Слева – среднесезонные автоковариационные функции озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие автоковариационные функции температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

В переходные сезоны на Рис. 6 на высотах тропосферы наблюдаются вторичные максимумы ковариаций температуры, указывающие на

периодические метеорологические процессы. В стратосфере до высоты 54 км в эти сезоны можно видеть протяженные слои с небольшими значениями ковариации и вторичные максимумы, отображающие периодичность процессов в соответствующих слоях. Выше 54 км имеет место резкое увеличение ковариаций с характерным временем затухания, превышающим интервал анализа, представленный на Рис. 6.

3.5. Автокорреляционные функции

На Рис. 7 показаны среднесезонные автокорреляционные функции (5) вариаций озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

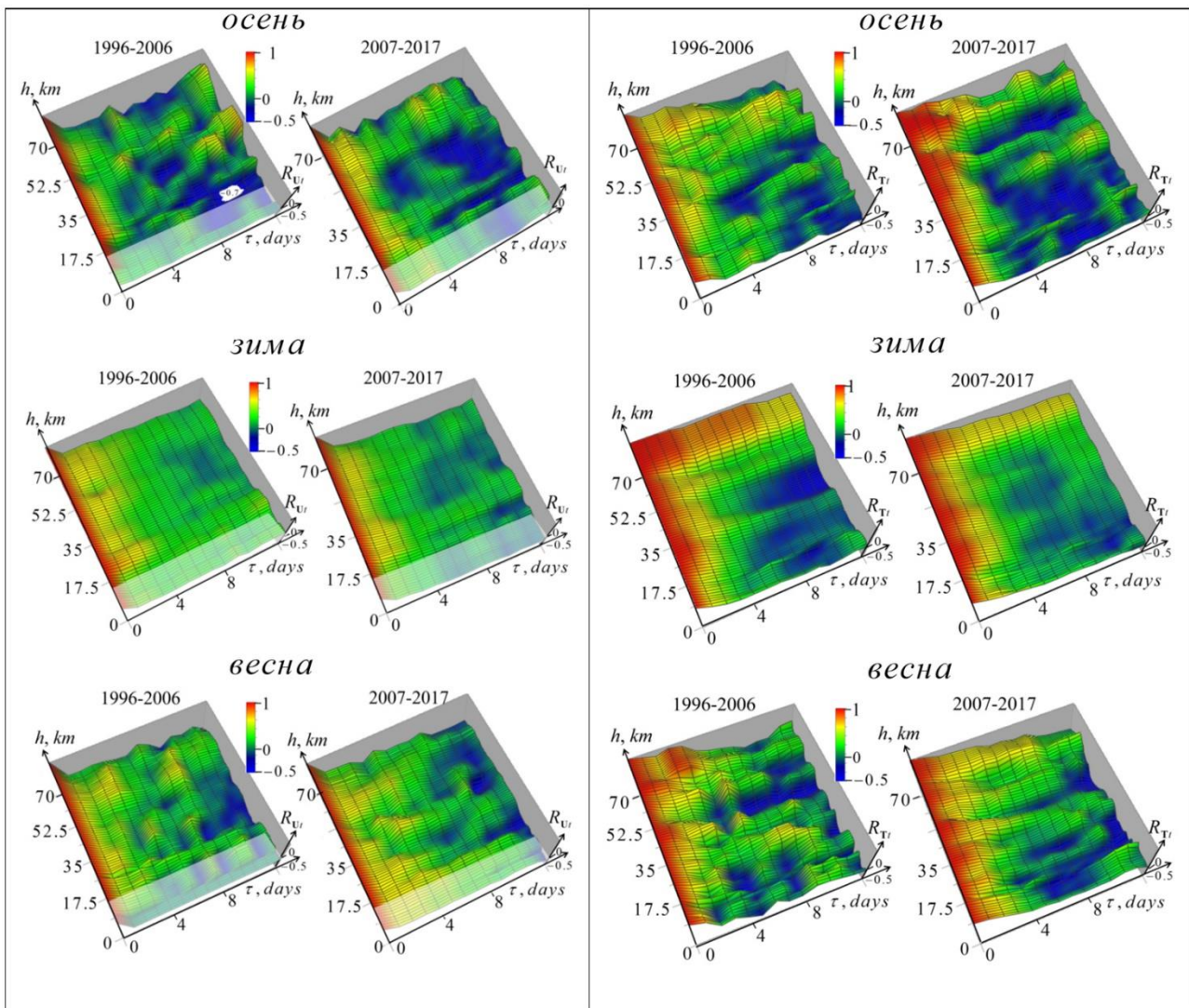


Рис. 7. Слева – среднесезонные автокорреляционные функции вариаций озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие автокорреляционные функции вариаций температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

Можно видеть, что автокорреляционные функции озона в осенний сезон спадают быстрее, чем соответствующие автоковариационные функции (см. Рис. 6) – с характерным временем 1-2 дня. В зимний сезон это время увеличивается до 3-5 дней в первой декаде и до 2-4 дней – во второй. В первой декаде зимой в слое до 35 км корреляция сохраняется на уровне около 0,2 на всем интервале анализа, а выше 55 км – на уровне около 0,1. От 35 до 55 км корреляция сохраняется до 10-11-го дня на уровне 0,1-0,2, а далее сменяется небольшой антикорреляцией, до -0,05. Во второй декаде этот переход происходит на 8-9-й день, и антикорреляция в некоторых местах доходит до -0,1. В весенний сезон время корреляции составляет от 2 до 5 дней. Так же, как и в осенних корреляционных функциях, имеются локальные максимумы корреляции и антикорреляции, указывающие на различные периодические процессы.

Небольших областей с экстремумами антикорреляции $R < -0,1$ немного, в осенний сезон:

$$\begin{aligned} R_{U_t}^{1996-2006}(h=16, \tau=12) &= -0,71, \quad R_{U_t}^{1996-2006}(h=20, \tau=8) = -0,42, \\ R_{U_t}^{1996-2006}(h=36, \tau=8) &= -0,40, \quad R_{U_t}^{1996-2006}(h=49, \tau=12) = -0,30, \\ R_{U_t}^{2007-2017}(h=19, \tau=10) &= -0,23, \quad R_{U_t}^{2007-2017}(h=32, \tau=12) = -0,44, \\ R_{U_t}^{2007-2017}(h=43, \tau=5) &= -0,38, \quad R_{U_t}^{2007-2017}(h=45, \tau=9) = -0,38; \end{aligned}$$

в весенний сезон:

$$\begin{aligned} R_{U_t}^{1996-2006}(h=25, \tau=10) &= -0,35 \text{ и } R_{U_t}^{2007-2017}(h=18, \tau=13) = -0,29, \\ R_{U_t}^{2007-2017}(h=41, \tau=12) &= -0,48, \quad R_{U_t}^{2007-2017}(h=51, \tau=13) = -0,24. \end{aligned}$$

В зимний сезон области значительной антикорреляции отсутствуют.

3.6. Частотные спектры

На Рис. 8 представлены частотные спектры (6) среднесезонных автоковариационных функций озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

На рисунке видно, что спектры охватывают весь интервал частот анализа, соответствующий неравномерной шкале периодов колебаний от 14 до 2 дней.

Во всех спектрах наибольшими являются компоненты, соответствующие периоду 14 дней. И для озона, и для температуры значения спектров вблизи этого периода во второй декаде оказались наибольшими в зимний сезон. Для озона значения спектра для 14-дневной компоненты в зимний и весенний сезоны несколько возрастают, а осенью убывают. Спектральные максимумы для этой компоненты в первой декаде находятся на следующих высотах: осенью 33 км, зимой 38 км, весной 34 км; во второй декаде осенью 28 и 40 км, зимой 30 и 43 км, весной 29 км.

Имеются также локальные спектральные максимумы озона с другими периодами. Так, осенью в первой декаде отметим возрастание наиболее высокочастотных 2-3-дневных спектральных компонент вокруг высоты 32 км, во второй декаде – около высоты 28 км.

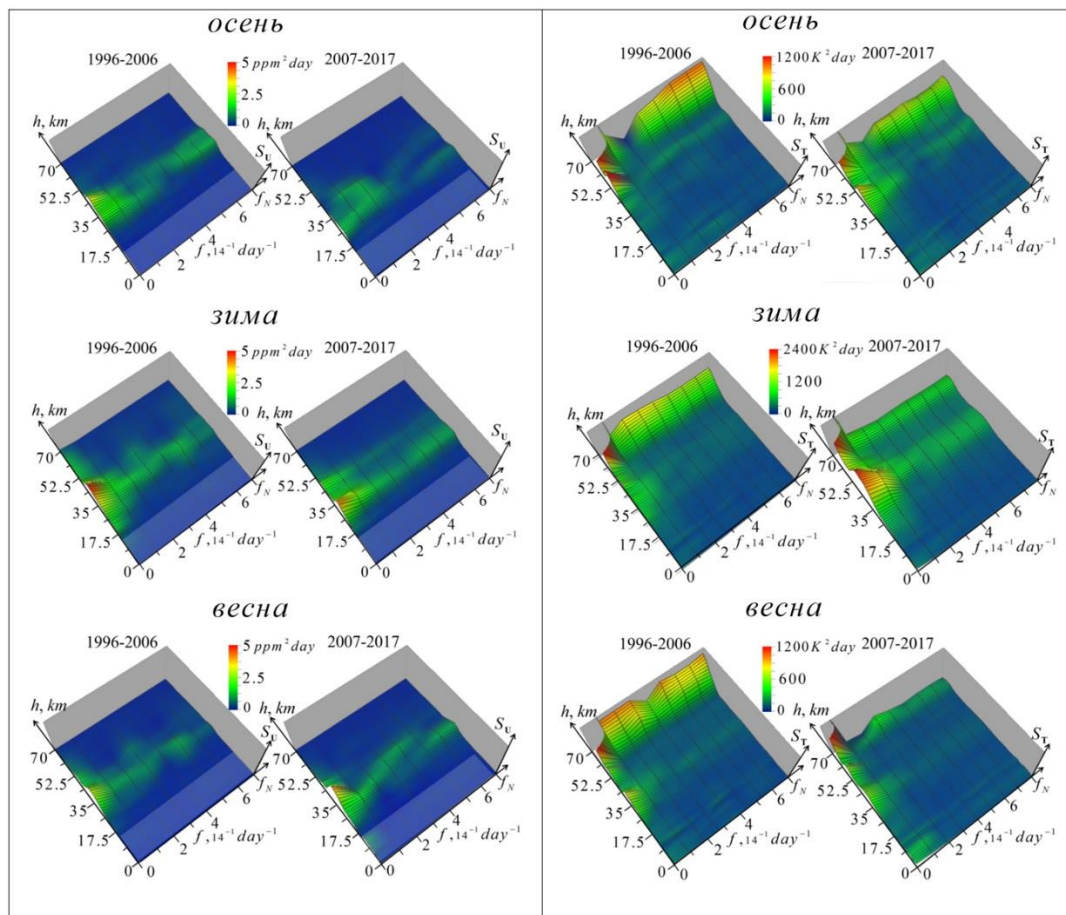


Рис. 8. Слева – частотные спектры среднесезонных автоковариационных функций озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие частотные спектры автоковариационных функций температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний; $f_N = 0,5 \text{ дн}^{-1}$ – частота Найквиста.

Зимой в первой декаде на Рис. 8 видны колебания с периодом около 4 дней вблизи высот 35 и 46 км и, более сильные, с периодом 2 дня, около высоты 35 км. Во второй декаде хорошо заметен протяженный на весь интервал частот спектр вблизи высоты 30 км с ростом интенсивности к наиболее короткопериодным компонентам, а также более слабые протяженные спектры на высоте 45 км. Весной спектральные особенности вариаций озона в первой декаде близки к их положению в зимний период: имеются 4-дневные спектральные максимумы на высотах 46 и 34 км и более сильные 2-дневные максимумы на высоте 35 км. Во второй декаде наиболее заметны 3-4-дневный максимум на высотах около 38 км и однодневный максимум на высоте 32 км.

В частотных спектрах вариаций температуры наибольшими также являются компоненты, соответствующие периоду 14 дней, причем в зимний сезон второй декады значения спектра вблизи этого периода существенно возрастают. Выше 60 км этот 14-дневный максимум очень высок и достигается за пределами показанного на рисунке интервала высот. Значения спектра 14-дневной компоненты во 2-й декаде также несколько возрастают и весенний сезон, а осенью убывают. Положения спектральных максимумов температуры ниже 60 км для 14-дневной компоненты таковы: в первой декаде осенью 49, 38, 27, 4 км, зимой 47, 38, 31, 11 км, весной 35, 11, 4 км; во второй декаде осенью 45 и 11 км, зимой 43, 12, 0 км, весной 54, 37, 12, 5, 0 км.

Кроме того, имеются локальные спектральные максимумы температуры с другими периодами. Осенью в первой декаде отметим возрастание 3-4 дневных спектральных компонент вокруг высоты 49 и 36 км, 5-6-дневных вокруг 12 км и 3-4-дневных ниже 6 км в тропосфере, а во второй декаде – 1-2-дневных около высоты 46 км. Зимой в первой декаде заметно повышение спектра в полосе 2-7 дней на высотах от 27 до 39 км с локальным максимумом для 3-4-дневных колебаний на 35 км, а во второй декаде – протяженное на весь интервал периодов повышение спектра вокруг высоты 41 км. Весной в первой декаде имеются 4- и 2-3- дневные спектральные максимумы на высоте 35 км и 3-4 дневные около

11 км, а во второй декаде видно повышение спектра в интервале периодов 2-7 дней на высотах 33-39 км.

3.7. Межвысотные ковариационные функции

На Рис. 9 представлены среднесезонные межвысотные ковариационные функции (7) для озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

Можно видеть некоторые общие особенности в распределениях ковариационных функций озона и температуры – возрастание их максимальных значений в зимний период, особенно значительное для функций температуры, и существенные изменения распределений во второй декаде. Но эти изменения оказались разнонаправленными: резкое падение ковариаций для озона и резкий их рост для температуры. Как и следовало ожидать, наибольшие значения ковариаций наблюдаются между близкими высотами.

Рассчитанные максимальные значения положительных ковариаций оказались по абсолютной величине значительно выше отрицательных, особенно для озона. Надо отметить, что, в целом, распределения ковариаций для озона и температуры сильно отличаются друг от друга.

В распределениях ковариаций озона на Рис. 9 имеются следующие особенности. Осенние распределения очень сходны для двух декад при небольшом снижении ковариаций во второй декаде. На удалении от линии одинаковых высот выше точки (15, 15) км имеются две области незначительной повышенной ковариации и область слабой отрицательной ковариации. В декаде 1996-2006 гг. повышенные ковариации озона имеют место в четырехугольных областях с координатами вершин ($h_x = 25$ км, $h_y = 18$ км), (48, 18), (36, 22), (46, 22) км и (45, 24), (69, 24), (52, 37), (70, 37) км, а слабо отрицательные – в области (54, 39), (70, 39), (60, 45), (70, 47) км.

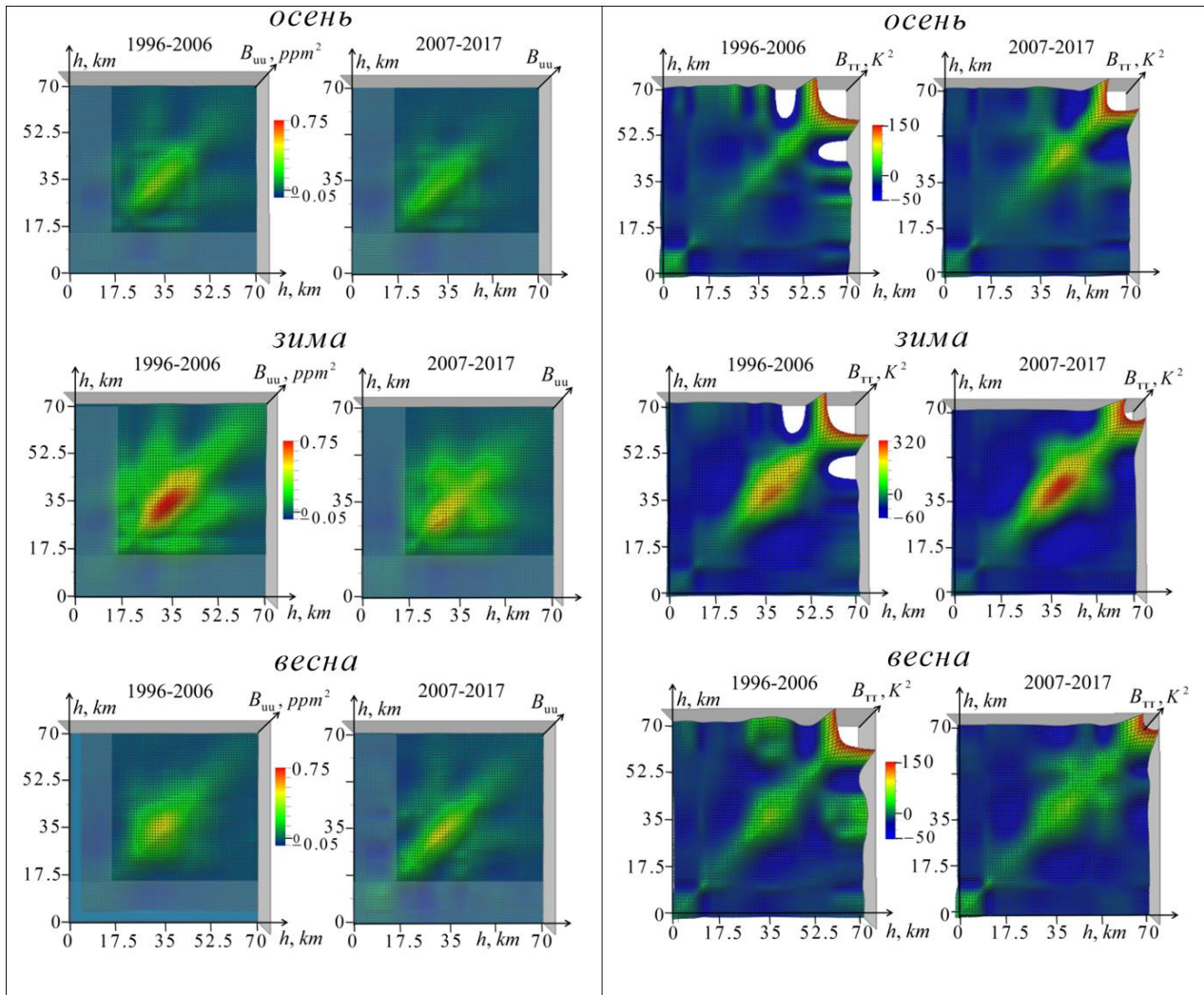


Рис. 9. Слева – среднесезонные межвысотные ковариационные функции озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие ковариационные функции температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

В декаде 2007-2017 гг. в областях повышенной ковариации наблюдается некоторое уменьшение ее величины, а область отрицательной ковариации сужается. Координаты вершин четырехугольных областей повышенных положительных значений: $(h_x = 30 \text{ км}, h_y = 17 \text{ км})$, $(49, 18)$, $(38, 27)$, $(64, 25) \text{ км}$ и $(45, 24)$, $(70, 24)$, $(52, 37)$, $(70, 37) \text{ км}$, а области отрицательных значений – $(51, 35)$, $(54, 35)$, $(53, 39)$, $(54, 39) \text{ км}$.

В зимний сезон ковариации озона выше 15 км существенно возрастают по сравнению с осенью и весной и не содержат отрицательных значений. При этом имеет место существенное (в 1,33 раза) уменьшение ковариаций в декаде 2007-2017 гг., которое соответствует резкому падению соответствующих по высоте

среднеквадратичных вариаций профиля озона и коррелирует с падением солнечной активности в этой декаде. Зимой распределения ковариаций в двух декадах по форме в основных деталях сходны между собой, но значительно отличаются от осенних и весенних распределений. Они имеют максимумы на линии равных высот со значениями $0,76 \text{ ppm}^2$ в точке ($h_x = 35 \text{ км}$, $h_y = 35 \text{ км}$) в первой декаде и $0,57 \text{ ppm}^2$ на $(30, 30) \text{ км}$ и $0,33 \text{ ppm}^2$ в точке на $(44, 44) \text{ км}$ во второй. В обеих декадах имеется полоса слабой ковариации на высоте $h_y = 20 \text{ км}$ со слабо выраженными максимумами со значениями $0,20 \text{ ppm}^2$ в точке $(39, 20) \text{ км}$ в первой декаде и $0,10 \text{ ppm}^2$ на $(46, 20) \text{ км}$ во второй. Соответственно, на высоте $h_y = 23 \text{ км}$ в обеих декадах имеется линейный локальный минимум. В первой декаде имеется также широкая по h_y полоса медленно спадающей вдоль $h_x = 34 \text{ км}$ ковариации. Аналогичную полосу можно видеть и во второй декаде вдоль высоты $h_x = 31 \text{ км}$ с локальным максимумом $0,29 \text{ ppm}^2$ в точке ($h_x = 47 \text{ км}$, $h_y = 31 \text{ км}$).

Весенние ковариационные функции озона на высотах около линии равных высот $h_x = h_y$ превышают осенние, особенно во второй декаде. По максимальным значениям весной междекадное различие незначительно, но распределение ковариаций озона во второй декаде более разнообразно. В первой декаде градиенты снижения ковариаций от линии равных высот монотонны, а отрицательные ковариации отсутствуют. Напротив, в декаде 2007-2017 гг. выше 15 км имеется полоса с локальными максимумами ковариации озона с координатами: ($h_x = 41 \text{ км}$, $h_y = 20 \text{ км}$), $(40, 25)$, $(43, 33) \text{ км}$, и полоса повышенных значений выше и ниже высоты 44 км . Имеются также две области со слабыми отрицательными ковариациями. Первая – внутри прямоугольника с вершинами $(47, 15)$, $(70, 15)$, $(54, 25)$, $(70, 25) \text{ км}$, а вторая – внутри окружности радиусом $4\text{-}5 \text{ км}$ и центром $(56, 42) \text{ км}$.

Распределения температурных ковариаций на Рис. 9 отличаются от ковариаций озона наличием широких областей отрицательных значений и резким ростом выше 60 км . Ниже этой высоты максимумы ковариаций температуры на линии равных высот расположены выше, чем максимумы

ковариаций озона на этой линии, находящиеся около максимумов относительного содержания озона.

Осенью эти максимумы ковариации температуры находятся около точек ($h_x = 46$ км, $h_y = 46$ км) и (49, 49) км в первой и второй декадах соответственно, зимой на (43, 43) и (42, 42) км, а весной – на (37, 37) км и (41, 41) км.

В осеннем сезоне во второй декаде наблюдается рост максимумов ковариаций в 1,33 раза. Этот рост соответствует и очевидно обусловлен значительным ростом вариаций температуры в 2007-2017 гг. (см. Рис. 3). Повышенные ковариации с температурами на высотах более 55 км наблюдаются для температур в слое 38-41 км в первой декаде и 33-41 км – во второй. Также в обеих декадах имеются незначительно повышенные ковариации в узком слое 12-14 км с температурами на высотах 12-60 км. Области отрицательных значений ковариаций температуры в первой декаде включают тропосферу по отношению к температурам выше тропопаузы и область округлой формы с центром в точке ($h_x = 48$ км, $h_y = 24$ км), которая вписывается в прямоугольник (41, 16), (54, 16), (41, 29), (54, 29) км. Во второй декаде отрицательные ковариации температуры в тропосфере наблюдаются по отношению к температурам от тропопаузы до 55 км. Имеется также уменьшившаяся область отрицательных ковариаций с тем же центром, которая вписывается в прямоугольник (43, 19), (50, 19), (43, 28), (50, 28) км.

В зимнем сезоне ниже 60 км имеет место более чем двукратный рост максимальных значений ковариаций температуры по сравнению с осенью и весной. Этот рост отображает рост вариаций температуры (см. Рис. 3). Наблюдается рост максимумов ковариаций во второй декаде по сравнению с первой в 1,15 раза – меньше, чем осенью (где рост вариаций температуры был больше), но больше, чем весной. За пределами повышенных около линии равных высот значений ковариаций в обеих декадах зимой преимущественно наблюдаются отрицательные ковариации с центрами в точках ($h_x = 30$ км, $h_y = 6$ км) и (44, 22) км в первой декаде и (39, 6), (44, 23) км – во второй.

В весеннем сезоне максимумы ковариации температуры в обеих декадах практически одинаковы. На линии равных высот имеются и вторичные максимумы около точек (53, 53) км в первой декаде и (54, 54) км – во второй. В первой декаде отрицательные ковариации температуры тропосферы наблюдаются по отношению к температурам от тропопаузы до 45 км, а во второй декаде – до 51 км. В каждой из декад наблюдается по две области повышенных отрицательных значений ковариаций с центрами в точках ($h_x = 39$ км, $h_y = 22$ км) и (53, 30) км в первой декаде и (39, 20), (55, 19) км – во второй. Вне этих областей значения ковариаций температуры слабо отрицательные или слабо положительные.

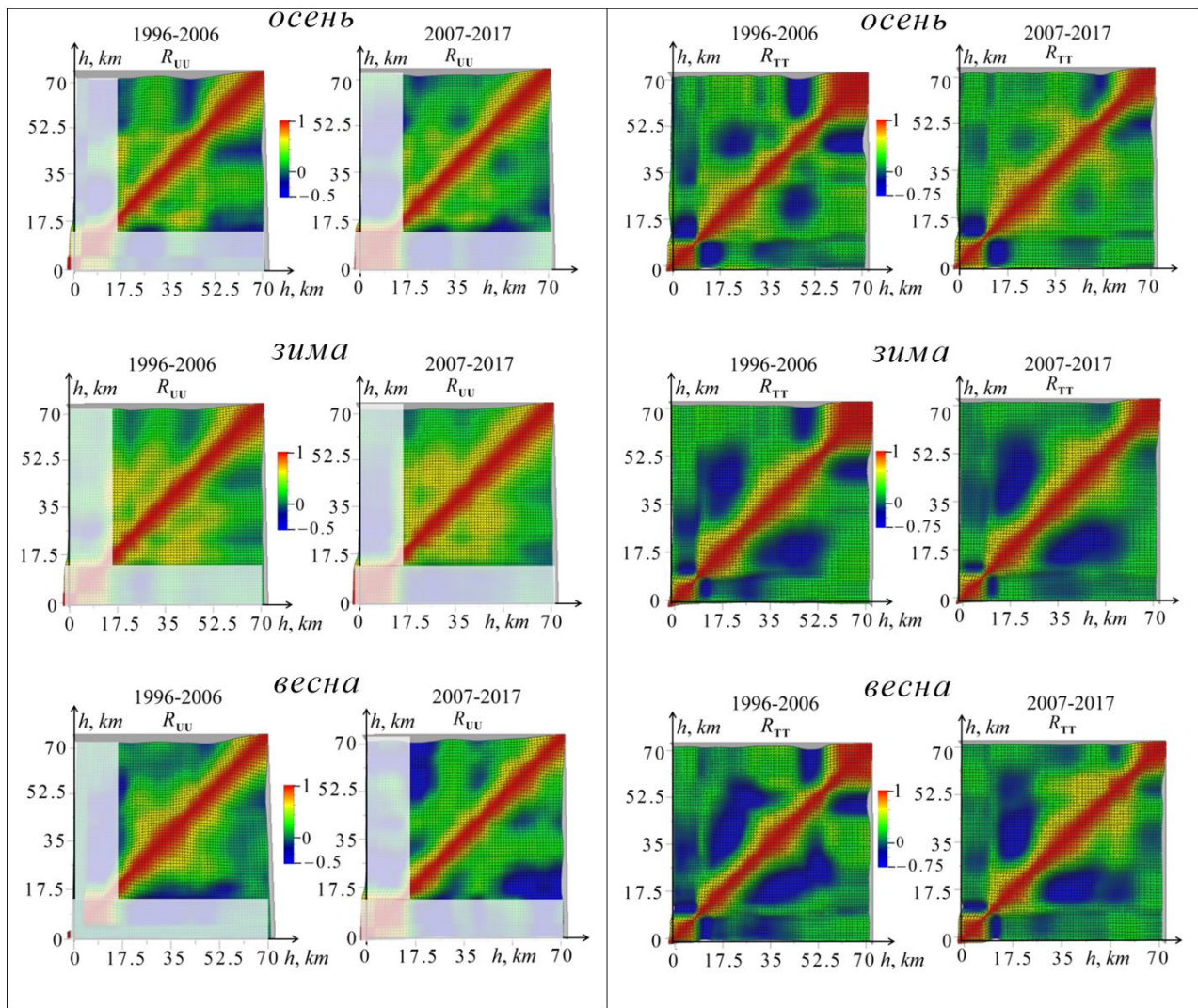


Рис. 10. Слева – среднесезонные межвысотные корреляционные функции озона для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.; справа – соответствующие корреляционные функции температуры. Верхний ряд – осенний сезон, средний – зимний, нижний – весенний.

3.8. Межвысотные корреляционные функции

На Рис. 10 представлены среднесезонные межвысотные корреляционные функции (8) для озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

Как отмечалось выше, границы между областями положительных и отрицательных значений корреляционных функций совпадают с соответствующими границами для ковариационных функций, однако из-за различия цветовых шкал положение границ на Рис. 9 и 10 может восприниматься по-разному. Можно видеть, что структура корреляционных функций озона на Рис. 10 схожа со структурой его ковариационных функций (Рис. 9), но области этих границ антиковариации видны на Рис. 10 существенно более отчетливо. То же самое, и даже в большей степени, относится к корреляционным функциям температуры. Кроме того, на Рис. 10 оказалось возможным продемонстрировать их на больших высотах, где соответствующие ковариационные функции температуры (Рис. 9) не удавалось представить в выбранном масштабе из-за их слишком больших значений.

В осенний сезон на Рис. 10 видно, что распределение сильных корреляций озона в стороны от линии равных высот неравномерно расширяется с ростом высоты, и наблюдаются сужения, где корреляции спадают быстрее. В декаде 1996-2006 гг. такие сужения имеют место около высот 15, 20, 25 и 50 км. Имеется также протяженная область более низкой корреляции. В ее трапециевидной части с вершинами ($h_x = 34$ км, $h_y = 25$ км), (70, 25), (47, 35), (70, 35) км значения корреляционной функции озона составляют около 0,3. Ниже имеется трапециевидная область (22, 15), (47, 15), (32, 24), (49, 24) км с локальным минимумом корреляционной функции 0,1 в точке (35, 22) км и максимумом 0,6 в точке (41, 17) км. Кроме того, имеются две области небольшой (-0,1...-0,2) км антикорреляции озона: (50, 15), (70, 15), (50, 20), (50, 70) км и (53, 40), (70, 40), (53, 41), (70, 47) км.

В декаде 2007-2017 гг. осенью у области сильной корреляции озона вдоль линии равных высот также имеются сужения около точек ($h_x = 15$ км, $h_y = 15$ км) и (20, 20), (25, 25) км, но на высоте 50 км сужение выражено слабее. Почти

сохраняется вторая трапецевидная область первой декады: (22, 16), (47, 16), (32, 24), (49, 24) км с локальным минимумом 0,15 в точке (35, 22) км и максимумом 0,6 в точке (40, 18) км. Первая же область со значениями корреляционной функции озона около 0,3 сокращается до треугольной с углами в точках: (36, 25), (47, 25), (47, 37) км. Появились также округлые локальные минимумы с незначительной антикорреляцией -0,05 в точке (52, 37) км и -0,16 в точке (69, 21) км. В остальной области анализа наблюдается незначительная положительная корреляция.

В зимний сезон распределение сильных озонных корреляций озона вдоль линии равных высот неравномерно расширяется с ростом высоты, чередуясь с сужениями. В декаде 1996-2006 гг., так же, как и в осеннем сезоне, можно видеть сужения около высот (15, 15), (20, 20), (25, 25) и (50, 50) км. Области антикорреляции отсутствуют. Границы чисто зеленого цвета включают область со значениями корреляции больше 0,3. Имеется также выделенная желтым цветом овальная область со значениями функции корреляции больше 0,5, аналогичная, но более широкая, чем в осенний период, с максимумом 0,6 в той же точке (41, 17) км. Еще один локальный максимум находится около точки (45, 25) км.

В декаде 2007-2017 гг. зимой также можно видеть сужения области сильных корреляций озона около точек равных высот (15, 15), (20, 20), (25, 25) км, однако, сужение около (50, 50) км отсутствует. Области антикорреляции тоже отсутствуют. От высоты 37 км на линии равных высот (вблизи озонового максимума) отходит выделенная ярко-желтым цветом область с повышенными значениями функции корреляции, граница которой по уровню 0,6 проходит через точки ($h_x = 38$ км, $h_y = 30$ км), (42, 25), (48, 30) км. Выше 37 км на линии равных высот область повышенных значений функции корреляции постепенно расширяется.

В весенний сезон распределение сильных озонных корреляций озона вдоль линии равных высот менее равномерно, чем осенью и зимой. В декаде 1996-2006 гг., также можно видеть сужения около высот ($h_x = 15$ км, $h_y = 15$ км) и

(20, 20) км. Спецификой распределения области сильных корреляций озона вдоль линии равных высот является ее значительное уширение на высотах, близких к максимуму относительного содержания озона, в стороны от точки (35, 35) км, составляющее 8 км при снижении к уровню корреляции 0,6. Границы чисто зеленого цвета включают область со значениями корреляции больше 0,3. Имеются две окрашенные синим области антикорреляции выше $h_y = 15$ км с минимальными значениями до -0,2.

В декаде 2007-2017 гг. весной можно видеть сужения области сильных корреляций озона около линии равных высот в точках (15, 15), (42, 42) и (60, 60) км. Область со значениями корреляции больше 0,3 выделена чистым зеленым цветом. Имеется область антикорреляции, внутри прямоугольника (48, 15), (70, 15), (48, 26), (70, 26) км с наибольшей антикорреляцией -0,4 в точках (55, 18) и (70, 16) км, выделенная синим и локальные минимумы с небольшой антикорреляцией -0,1 в точках (56, 41) и (70, 40) км.

Корреляционные функции температуры в двух декадах схожи по общей структуре. В частности, их распределениях наблюдаются широкие области антикорреляции с глубокими минимумами, которые преимущественно коррелируют с областями положительной корреляции озона. Отметим также, что поскольку в декаде 1996-2006 гг. профили температуры выше 60 км получались путем интерполяции, это могло проявиться в наблюдаемом этой декаде большем уширении области сильных корреляций на этих высотах по сравнению с декадой 2007-2017 гг.

В тропосфере можно видеть резкую трансформацию корреляционных функций температуры около высоты 10 км, включая резкое сжатие на этой высоте области повышенных значений корреляции вдоль линии равных высот. На верхней границе тропосферы около 12 км во всех сезонах и обеих декадах наблюдается тонкий слой с околонулевой корреляцией с температурой выше и ниже этой высоты. Также во всех распределениях на Рис. 10 имеет место значительная корреляция между температурами на высотах в слое от 0 до 11 км, убывающая от 1 линии равных высот до минимального значения

$R_{TT}(h_x = 11 \text{ км}, h_y = 1 \text{ км}) = 0,6$. В распределениях функция корреляции температур тропосферы в слое 0-11 км с температурами стратосферы выше 12 км наблюдается область значимой антикорреляции на высотах от 13 до 18-20 км. Минимальные значения в этой области осенью достигаются в точке (15, 8) км и составляют -0,76 в первой декаде и -0,68 – во второй. Зимой глубина этих минимумов уменьшаются и составляют -0,57 на (13, 8) км и -0,46 в точке (13, 7) км, а весной -0,60 в точке (13, 8) км в обеих декадах. Корреляции температур тропосферы с температурами стратосферы выше 18-20 км преимущественно слабо отрицательные, и достигают минимальных значений -0,4...-0,3 для рассматриваемых сезонов в первой декаде. Области незначительной положительной корреляции с температурами выше 50 км наблюдаются в соответствующих распределениях корреляции для второй декады.

В стратосфере и нижней мезосфере в осеннем сезоне первой декады в области повышенных значений корреляции вокруг линии равных высот видны сжатия около высот (10, 10), (31, 31), (43, 43) и (54,54) км с последующими расширениями. Области небольшой (0,1-0,3) положительной корреляции температуры на Рис. 10 окрашены зеленым. Имеются также участки антикорреляции, окрашенные синим: область округлой формы с значением антикорреляции -0,4 в центральной точке (45, 23) км и область внутри четырехугольника с вершинами (55, 43), (60, 51), (70, 43) и (70, 51) км с значениями антикорреляции -0,4...-0,65, а также две небольшие сине-зеленые области с антикорреляцией до -0.15.

Во второй декаде осенью у области повышенных значений корреляции температуры вокруг линии равных высот также есть сжатие около 10 км и значительное расширение, до 9 км по уровню $R = 0,6$, в стороны от точки (24, 24) км. Далее видны сжатие к точке (31, 31) км, затем до высоты 43 км сохраняется постоянная, но бóльшая, чем в первой декаде, ширина зоны повышенных корреляций (6 км) Выше 43 км происходят ее расширение до 9 км с последующим сужением к точке (53, 53) км, а начиная с уровня (60, 60) км – резкое расширение. Области небольшой (0,1-0,3) положительной корреляции

температуры окрашены зеленым. Так же, как и в первой декаде, имеется округлая область антикорреляции, но незначительной по величине, до $-0,2$ в центральной точке ($h_x = 45$ км, $h_y = 23$ км). Наблюдаются и сходная с первой декадой область антикорреляции в четырехугольнике с вершинами (55, 46), (64, 54), (70, 46), (70, 54) км, но с меньшими значениями $-0,2 \dots -0,4$, и небольшие сине-зеленые области с малой антикорреляцией до $-0,1$.

В зимнем сезоне распределения корреляционных функций температуры стратосферы и нижней мезосферы значительно отличаются от осеннего и весеннего: за пределами области высокой (от 1 до 0,3) корреляции около линии равных высот преимущественно наблюдается антикорреляция. В первой декаде зимой отметим расширения зоны значений корреляции, превышающих 0,3: до 14 км около точки ($h_x = 12$ км, $h_y = 12$ км) на линии равных высот и до 13-14 км в точках равных высот от (32, 32) до (43, 43) км. Еще более значительное расширение (но, как отмечалось ранее, завышенное в этой декаде из-за вклада ошибок интерполяции) наблюдается выше точки (55, 55) км. Области наибольшей антикорреляции со значениями до $-0,35$ в точке (28, 5) км в тропосфере, до $-0,5$ в точке нижней стратосферы (43, 18) км и до $-0,45$ в точке (69, 47) км в верхней стратосфере внутри четырехугольника с вершинами (58, 42), (58, 52), (70, 42), (70, 52) км представлены синим цветом. Область небольшой положительной корреляции, до 0,16, находится в четырехугольнике с вершинами (54, 0), (60, 21), (70, 0) и (70, 21) км.

В зимнем сезоне второй декады тоже имеются расширения зоны значений корреляции, превышающих 0,3: до 12 км около точки равных высот (12, 12) км, до 13-17 км около точек от (35, 35) до (45, 45) км. Далее видно значительное расширение этой зоны выше точки (55, 55) км также может быть несколько завышено из-за вклада ошибок интерполяции. Области наибольшей антикорреляции температуры со значениями до $-0,2$ в точке (35, 4) км в тропосфере, до $R = -0,5$ в точке нижней стратосферы (40, 18) км и до $-0,25$ в точке (69, 51) км в верхней стратосфере внутри четырехугольника с вершинами (58, 42), (58, 52), (70, 42), (70, 52) км также представлены синим цветом.

В четырехугольнике с вершинами ($h_x = 61$ км, $h_y = 9$ км), (64, 16), (70, 9) и (70, 16) км находится область небольшой, до 0,16, положительной корреляции.

В весеннем сезоне области антикорреляции температуры оказались шире, чем в осеннем, но уже, чем в зимнем. В первой декаде имеются расширения зоны значений корреляции, превышающих значение 0,6: до 7 км в стороны от точки (13, 13) км на линии равных высот, и до 9 км на высотах от точки (32, 32) км. Еще более значительное расширение на высотах больше (57, 57) км, как отмечалось ранее, завышено. Области наибольшей антикорреляции температуры со значениями до -0,57 вблизи точки (11, 7) км в тропосфере, до -0,5 вокруг точки (43, 21) км в нижней стратосфере и до -0,42 в точке (69, 50) км в верхней стратосфере в пределах четырехугольника с вершинами (57, 46), (61, 53), (70, 46) и (70, 53) км изображены синим цветом. Положительная корреляция температуры от 0,15 до 0,4 наблюдается в округлой зеленой области с центром в точке (50, 50) км. Более темным оттенком зеленого выделены области корреляции со значениями до 0,15.

В весеннем сезоне второй декады после расширения зоны значений корреляции температуры, превышающих 0,6, до 8 км, около точки (14, 14) км на линии равных высот, происходят уменьшение ширины этой зоны до 4 км и, начиная с точки (33, 33) км, снова наблюдается расширение до 9 км. Далее, после некоторого сужения до 7 км, видны локальное расширение до 13 км на высоте (41, 41) км, снова сужение до 5 км около точки (49, 49) км, затем расширение до 7 км вблизи точки (51, 51) км и далее сужение до 3-4 км от точки (58, 58) км. Последующее значительное расширение области высокой корреляции выше (60, 60) км, вероятно, несколько завышено. Положительная корреляция от 0,15 до 0,5 наблюдается в зеленой области, прилегающей к зоне высоких значений корреляции температуры вокруг линии равных высот. Более темным оттенком зеленого выделены области с меньшей положительной корреляцией, до значений 0,15.

Заключение

Проведенный анализ выявил существенные отличия статистических параметров и их междекадных изменений для зимнего сезона от соответствующих характеристик переходных осеннего и весеннего сезонов, между которыми, наоборот, есть много сходства.

Сравнение среднесезонных профилей относительного содержания озона и температуры над Москвой, их среднеквадратичных отклонений (вариаций) и междекадных изменений этих параметров позволило установить, что в зимнем сезоне декады 2007-2017 гг. с пониженной солнечной активностью в среднесезонных профилях температуры наблюдался наиболее значительный спад в слое между 30 и 49 км, до $-8,4$ К на высоте 37 км.

Результат особенно интересен потому, что этот спад в декаде с пониженной солнечной активностью коррелирует с наиболее значительным спадом в среднезимних вариациях озона выше 29 км с максимальным значением $-0,23$ ppm (28 %) на 38-39 км, а также со спадом в среднедекадных вариациях содержания озона, который был обнаружен нами ранее [2]. Кроме того, в области этого спада температуры имеет место рост среднесезонных вариаций температуры. Также в ней происходит спад в среднезимнем профиле озона на высотах 34-37 км между двумя областями повышения его содержания в слоях 15-33 км и 38-52 км. Наконец, было обнаружено, что аналогичные высотные соответствия максимумов спада температуры с максимумами спада среднесезонного содержания озона и его вариаций имеют место в осеннем и весеннем сезонах.

Было установлено, что в зимнем сезоне в основной части озонового слоя на высотах 15-55 км среднесезонные вариации как озона, так и температуры значительно превосходят осенние и весенние вариации.

Среди других обнаруженных междекадных изменений следует отметить, что, в осеннем и весеннем сезонах декады 2007-2017 гг. наблюдался прирост вариаций содержания озона на высотах ниже 29 км с максимумами $0,15$ ppm

на 22 км осенью и 0,19 ppm на 20 км весной, сопоставимый по величине со средними значениями вариаций в первой декаде, небольшими на этих высотах.

Впервые в исследованиях озоносферы были применены и получены среднесезонные межвысотные совместные озон-температурные корреляционные и ковариационные функции для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. Обнаружено, что области наибольшей корреляции и ковариации озона с температурой наблюдаются для температуры на высотах ниже 35 км, а области наибольшей антикорреляции и антиковариации – выше этой высоты. Общей особенностью распределений является наличие максимумов корреляции и ковариации между содержанием озона на высотах около 29 км и температурами на высотах около 24 км. Также можно наблюдать второй максимум корреляции между озоном на различных высотах примерно от 45 до 60 км и температурами около 34 км. Приведены точные положения и значения экстремумов корреляции и антикорреляции, в также положения границ соответствующих областей. Области антикорреляции менее упорядочены, а ее максимумы относительно невелики. В зимний период корреляции оказываются существенно выше, чем осенью и весной; при этом они заметно возрастают в декаде 2007-2017 гг.

Новая информация была получена на основе сопоставления распределений и трендов среднесезонных структурных, автоковариационных и автокорреляционных функций вариаций озона и температуры, а также их частотных спектров.

Оказалось, что структурные функции ковариаций озона достигают насыщения за 4-7 дней. Наблюдается также и вторичный максимум, возможно связанный с нестационарностью или являющийся проявлением периодического процесса. Структурные функции температуры в основной области озонового слоя (15-55 км) насыщаются за 3-4 дня для осеннего сезона, зимой – за 10-13 дней. Весной в декаде 1996-2006 гг. насыщение происходило за 13 дней, а в декаде 2007-2017 гг. структурная функция не достигала насыщения.

Исследование среднесезонных автоковариационных функций вариаций озона и температуры показало, что их значения были существенно выше

в зимний сезон, чем осенью и весной. При этом, для функций озона в интервале высот 30-46 км имело место значительное снижение в декаде 2007-2017 гг. с пониженной солнечной активностью по сравнению с декадой 1996-2006 гг., совпадающее со значительным снижением среднеквадратичных отклонений профилей озона. У функций температуры, наоборот, наблюдался значительный рост при отсутствии заметных изменений вариаций. Автоковариационные функции озона спадают с характерным временем около 3 дней, а наличие в них локальных максимумов указывает на присутствие периодических процессов.

Автоковариационные функции температуры на высотах 15-55 км также спадают с характерным временем около 3 дней; при этом высоты наибольших ковариаций температуры во второй декаде существенно возросли. В тропосфере в переходные сезоны (осень и весна) видны вторичные максимумы, указывающие на периодические метеорологические процессы. В стратосфере до высоты 54 км в эти сезоны были заметны протяженные слои с небольшими значениями ковариации и вторичные максимумы, отображающие периоды процессов в соответствующих слоях. Выше 54 км имеет место резкое увеличение ковариаций температуры с характерным временем затухания, превышающим интервал анализа.

Автокорреляционные функции озона в осенний сезон спадают с характерным временем 1-2 дня. В зимний сезон это время составляет до 3-5 дней в первой декаде и до 2-4 дней – во второй. В весенний сезон время корреляции составляет от 2 до 5 дней. Так же, как и в осенних корреляционных функциях, весной имеются локальные максимумы корреляции и антикорреляции озона, указывающие на различные периодические процессы.

Результаты анализа частотных спектров среднесезонных автоковариационных функций озона и температуры показали, что эти спектры охватывают весь интервал частот анализа, и наибольшими являются спектральные компоненты, соответствующие периоду 14 дней. И для озона, и для температуры значения спектра вблизи этого периода во второй декаде существенно больше в зимний сезон. Спектральные максимумы для 14-дневной

компоненты в первой декаде находятся на высотах: осенью 33 км, зимой 38 км, весной 34 км; во второй декаде: осенью 28 и 40 км, зимой 30 и 43 км, весной 29 км. Другие локальные спектральные максимумы соответствуют периодам колебаний озона 1-4 дня.

В температурных частотных спектрах компоненты, соответствующие периоду 14 дней, в декаде 2007-2017 гг. существенно возрастают в зимний сезон, а также несколько возрастают весной, а осенью убывают. Выше 60 км этот 14-дневный максимум очень высок. Положения наблюдаемых спектральных максимумов ниже 60 км для 14-дневной компоненты в первой декаде: осенью 49, 38, 27, 4 км, зимой 47, 38, 31, 11 км, весной 35, 11, 4 км; во второй декаде: осенью 45 и 11 км, зимой 43, 12, 0 км, весной 54, 37, 12, 5, 0 км. Другие локальные спектральные максимумы температуры имеют периоды 1-7 дней.

Также было выполнено подробное исследование и сравнение среднесезонных межвысотных ковариационных и корреляционных функций для озона и температуры для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг.

В распределениях ковариационных функций озона и температуры были выявлены общие особенности: возрастание их максимальных значений в зимний период, особенно существенное для функций температуры, и значительные изменения распределений в декаде 2007-2017 гг. Но эти изменения оказались разнонаправленными: резкое падение ковариаций озона и резкий их рост для температуры. Наибольшие значения ковариаций наблюдаются между близкими высотами. Максимальные абсолютные значения положительных ковариаций оказались значительно выше отрицательных, особенно для озона. Подробно описаны детали структуры распределений ковариационных функций.

Осенние распределения ковариаций озона сходны для двух декад при небольшом снижении ковариаций во второй декаде. Весенние ковариационные функции на высотах около линии равных высот превышают осенние, особенно во второй декаде. По максимальным значениям ковариаций весной различие между декадами незначительно, но распределение ковариаций озона во второй

декаде более разнообразно. В первой декаде градиенты снижения ковариаций от линии равных высот монотонны, а отрицательные ковариации отсутствуют.

В зимний сезон ковариации озона выше 15 км существенно возрастают по сравнению с осенью и весной и не содержат отрицательных значений. При этом имеет место существенное (до 1.33 раза) уменьшение ковариаций в декаде 2007-2017 гг., которое соответствует резкому падению соответствующих по высоте вариаций профиля озона и коррелирует с падением солнечной активности в этой декаде.

Распределения температурных ковариаций отличаются от ковариаций озона наличием широких областей отрицательных значений и резким ростом выше 60 км. Ниже этой высоты максимумы ковариации температуры на линии равных высот расположены выше максимумов в распределениях ковариаций озона на этой линии, находящихся около максимума относительного содержания озона.

В осеннем сезоне второй декады максимумы ковариаций температуры выросли примерно в 1,33 раза. Этот рост соответствует и, очевидно, обусловлен значительным ростом среднеквадратичных отклонений (вариаций) температуры осенью в 2007-2017 гг. В зимнем сезоне второй декады происходит более чем двукратный рост максимальных значений ковариаций по сравнению с осенью и весной. Этот рост отображает рост вариаций профилей температуры. Зимой наблюдался также рост максимумов ковариаций во второй декаде по сравнению с первой в 1,15 раза – меньше, чем осенью, но больше, чем весной, когда максимумы ковариации в двух декадах были практически одинаковы.

Структура среднесезонных корреляционных функций озона схожа со структурой его ковариационных функций, но, благодаря их нормировке на единицу, детали корреляций в областях малых абсолютных значений различимы более отчетливо. В осенний и зимний сезоны распределение сильных корреляций озона в стороны от линии равных высот неравномерно расширяется с ростом высоты, наблюдаются сужения, где корреляции спадают быстрее. В зимний сезон области антикорреляции отсутствуют. В весенний сезон декады

1996-2006 гг. спецификой распределения области сильных корреляций вдоль озона линии равных высот является значительное ее уширение на высотах, близких к озоновому максимуму около 35 км.

Структуры корреляционных функций температуры в двух декадах весьма схожи. В распределениях корреляционных функций температуры наблюдаются более широкие области антикорреляции, чем в функциях для озона, и с более глубокими минимумами. Как правило, эти области расположены в областях повышенной корреляции озона. Также можно видеть резкую трансформацию корреляционных функций температуры в верхней тропосфере около высоты 10 км, включая резкое сжатие на этой высоте области повышенных значений корреляции вдоль линии равных высот. Приведено детальное описание и сравнение структуры корреляционных функций для деkad 1996-2006 и 2007-2017 гг.

Авторы признательны бывшим научным сотрудникам ФИАН С.В. Соломонову – научному руководителю Лаборатории спектроскопии миллиметровых волн ФИАН и Е.П. Кропоткиной, а также А.Н. Игнатьеву и А.Н. Лукину, благодаря которым были получены данные многолетних измерений профилей озона, использованные в этой работе.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН, проект FFUF-2024-0019.

Литература

1. Gaikovich K.P., Rozanov S.B. Ozone and Temperature Seasonal Statistics by Data of 1996-2017 Ground-Based Microwave Radiometry // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2024. – P. 12-15.
<https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10846815>
2. Gaikovich K.P., Kropotkina E.P., Rozanov S.B. Statistical analysis of 1996–2017 ozone profile data obtained by ground-based microwave radiometry // Remote Sensing. – 2020. – V. 12. – No. 20. – P. 3374. <https://doi.org/10.3390/rs12203374>
3. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б. Статистические параметры озонного профиля над Москвой и их тренды в 1996-2017 гг. по данным радиометрических измерений // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 8.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.14>
4. Montzka S.A. et al. Scientific assessment of ozone depletion: 2010 // Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 51. – 2011.
<https://ozone.unep.org/sites/default/files/2023-02/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022.pdf>
5. Moreira L. et al. The natural oscillations in stratospheric ozone observed by the GROMOS microwave radiometer at the NDACC station Bern // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – V. 16. – No. 16. – P. 10455-10467.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-10455-2016>
6. Randel W.J. et al. A simple model of ozone–temperature coupling in the tropical lower stratosphere // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2021. – V. 21. – No. 24. – P. 18531-18542. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18531-2021>
7. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. – Гидрометеиздат, 1987. <https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10846815>
8. Stolarski R.S. et al. Ozone temperature correlations in the upper stratosphere as a measure of chlorine content // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2012. – V. 117. – No. D10. <https://doi.org/10.1029/2012JD017456>

9. Huang F.T. et al. Ozone quasi-biennial oscillations (QBO), semiannual oscillations (SAO), and correlations with temperature in the mesosphere, lower thermosphere, and stratosphere, based on measurements from SABER on TIMED and MLS on UARS // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2008. – V. 113. – No. A1. – P. A01316. <https://doi.org/10.1029/2007JA012634>
10. Huang F.T. et al. Ozone and temperature decadal trends in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere, based on measurements from SABER on TIMED // *Annales geophysicae*. – Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2014. – V. 32. – No. 8. – P. 935-949. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-935-2014>
11. Huang F.T. et al. Ozone and temperature decadal responses to solar variability in the mesosphere and lower thermosphere, based on measurements from SABER on TIMED // *Annales Geophysicae*. – Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2016. – V. 34. – No. 1. – P. 29-40. <https://doi.org/10.5194/angeo-34-29-2016>
12. Huang F.T., Mayr H.G. Ozone and temperature decadal solar-cycle responses, and their relation to diurnal variations in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, based on measurements from SABER on TIMED // *Annales Geophysicae*. – Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2019. – V. 37. – No. 4. – P. 471-485. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-471-2019>
13. Zhou L., Xia Y., Zhao C. Influence of stratospheric ozone changes on stratospheric temperature trends in recent decades // *Remote Sensing*. – 2022. – V. 14. – No. 21. – P. 5364. <https://doi.org/10.3390/rs14215364>
14. Hocke K., Sauvageat E. Frequency Dependence of the Correlation between Ozone and Temperature Oscillations in the Middle Atmosphere // *Atmosphere*. – 2023. – V. 14. – No. 9. – P. 1436. <https://doi.org/10.3390/atmos14091436>
15. Соломонов С.В. и др. Спектрорадиометр для дистанционного зондирования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах // *Радиотехника и электроника*. – 2000. – Т. 45. – №12. – С.1519-1525.
16. Соломонов С.В. и др. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах // *Приборы и техника эксперимента*. – 2009. – №. 2. – С. 138-144.

17. Gaikovich K.P. Tikhonov's method of the ground-based radiometric retrieval of the ozone profile // Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 1994. – V. 4. – P. 1901-1903.
https://gaikovich.narod.ru/papers/IGARSS94_1.pdf
18. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. Solutions of ill-posed problems. – New York: Winston USA, 1977.
19. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. Определение вертикального профиля атмосферного озона по наземным измерениям излучения в миллиметровом диапазоне // Изв. АН. Физ. атмосф. и океана. – 1999. – Т. 35. – № 1. – С. 86-95. https://gaikovich.narod.ru/papers/FAO1_99.pdf
20. Соломонов С.В. и др. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2011. – Т. 54. – №. 2. – С. 113-122. https://gaikovich.narod.ru/papers/rf_2011.pdf
21. Кропоткина Е.П. и др. Особенности изменений содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – №. 2. – С. 227-235. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010097>
22. Solomonov S.V. et al. Some features of the vertical ozone distribution from millimeter wave measurements at Pushchino and Onsala observatories // Journal of atmospheric and terrestrial physics. – 1994. – V. 56. – No. 1. – P. 9-15.
23. Rozanov S.B. et al. Ground-based remote sensing of the atmospheric ozone over Moscow at millimeter waves // Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XI. – SPIE, 2006. – . 6362. – С. 464-474.
24. Соломонов С.В. и др. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней стратосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – №. 3. – С. 392-400. <https://doi.org/10.7868/S0016794017020146>

25. Kropotkina E.P. et al. Characteristics of Changes in the Ozone Content in the Upper Stratosphere over Moscow during the Cold Half-Years of 2014–2015 and 2015–2016 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2019. – V. 59. – No. 2. – P. 212-220. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010092>
26. Rozanov S.B. et al. Microwave measurements of stratospheric and mesospheric ozone in Moscow // IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2018. – P. 3116-3119. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518910>
27. The British Atmospheric Data Centre (BADC). http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_ASSIM
28. Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный. <http://www.cao-rhms.ru/>
29. COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA-86). <https://www.aparc-climate.org/data-centre/data-access/reference-climatology/cira-86>
30. Sounding systems and radiosondes // Vaisala. <https://www.vaisala.com/en/sounding-systems-radiosondes/>

Для цитирования:

Гайкович К.П., Розанов С.Б. Сравнение и корреляции среднесезонных статистических параметров стратосферного озона и температуры по данным радиометрических и спутниковых измерений в 1996-2017 гг. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.6>