

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.14>

УДК: 621.371+537.87

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЗОННОГО ПРОФИЛЯ НАД МОСКВОЙ И ИХ ТРЕНДЫ В 1996-2017 ГГ. ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

К.П. Гайкович <sup>1</sup>, Е.П. Кропоткина <sup>2</sup>, С.Б. Розанов <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950

<sup>2</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, ГСП-1, Москва, 119991

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений Госстандарта РФ, Московская обл., 141570

Статья поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

**Аннотация.** Представлены результаты статистического анализа высотных профилей объемного отношения смеси озона в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, полученных по данным наземных радиометрических измерений на частоте 142,2 ГГц в 1996-2017 гг. При сравнении данных для декад 1996-2006 и 2007-2017 гг. обнаружены статистически значимые тренды среднемесячных профилей озона и их вариаций, а также соответствующих межвысотных и временных ковариационных и корреляционных функций. Предложены возможные объяснения обнаруженных трендов.

**Ключевые слова:** микроволновая радиометрия, высотный профиль озона, стратосфера, статистический анализ.

**Abstract.** Results of the statistical analysis of the altitude profiles of the volume ozone mixing ratio retrieved from data of 1996-2017 ground-based radiometer measurements at frequency of 142.2 GHz are presented. From comparison of the data for the 1996-2006 and 2007-2017 decades, statistically significant trends have been revealed in monthly mean ozone profiles and their variations – as well as in corresponding inter-altitude and time covariance and correlation functions. Possible explanations of the revealed trends are given.

**Key words:** microwave radiometry, altitude ozone profile, stratosphere, statistical analysis.

## Введение

Основные факторы, влияющие на профиль озона и его интегральное содержание в стратосфере (около 90% от полного содержания озона в вертикальном столбе атмосферы) на временных масштабах недель и месяцев – это стратосферная динамика (как крупномасштабная, так и локальная), фотохимические процессы и реакции с примесями). Эти факторы взаимосвязаны, сезонно зависимы и существенно варьируют год от года. Динамика более значима в нижней и средней стратосфере, тогда как в верхней стратосфере и мезосфере возрастает роль фотохимии. До настоящего времени надежный прогноз крупномасштабных динамических процессов, таких как планетарные волны, стратосферные потепления, и их трендов, не представляется возможным. На временных масштабах лет и десятилетий на стратосферный озон оказывают влияние солнечная активность, квазидвухлетние и другие периодические атмосферные и океанические процессы, тренды содержания озоноразрушающих примесей и пространственного распределения аэрозолей вулканического и иного происхождения.

Истощение озонного слоя, который защищает жизнь на Земле от УФ солнечного излучения, антропогенными хлором и бромом остается одной из главных проблем экологии и физики атмосферы. Было установлено, что меры, принятые в соответствии с Монреальским протоколом, позволили остановить процесс истощения стратосферного озона на рубеже примерно 1996-1997 гг., и к 2016-2017 гг. наблюдалось возрастание озона, но только в верхней стратосфере и почти без увеличения его интегрального содержания в столбе атмосферы [1,2]. В последние годы выполнялись многочисленные исследования, связанные с влиянием динамики атмосферы на содержание и пространственное распределение озона и других малых газовых составляющих. На основе экспериментальных данных разрабатывались модели динамики, химических процессов и теплового режима атмосферы, однако природа и особенности истощения озонного слоя остаются еще недостаточно исследованными и иногда непредсказуемыми – как арктическая озонная дыра весной 2011 г. [3]. Поэтому

для верификации и контроля восстановления озонного слоя необходимо продолжать длительные качественные наблюдения с различных независимых платформ и проводить сравнение данных из различных источников [1].

В этой связи, рассматриваемые ниже результаты статистического анализа ансамбля высотных профилей объемного отношения смеси озона в стратосфере и нижней мезосфере, сформированного по данным наземных измерений в одном и том же месте (Москве) и одним и тем же методом за период с 1996 по 2017 гг., представляют особый интерес не только в связи с их продолжительностью, но и с тем, что их начало практически совпадает с началом восстановления озонного слоя, а период измерений почти точно соответствует 23-му и 24-му циклам солнечной активности. Географическое положение Москвы ( $55,70^{\circ}\text{N}$ ,  $37,57^{\circ}\text{E}$ ) 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.

## **1. Метод измерений и ансамбли данных.**

Измерения спектральной линии атмосферного озона с центральной частотой  $142,175\text{ ГГц}$  проводились в ФИАН в дневные часы с использованием спектрометра со смесителем на планарном диоде Шотки [4, 5]. Спектрометр имел однополосную шумовую температуру около  $1500\text{ К}$  без охлаждения. Ширина полосы анализатора спектра равнялась  $283\text{ МГц}$  при разрешении  $0,2\text{--}20\text{ МГц}$  (80 каналов) до 2007 г. и  $475\text{ МГц}$  при разрешении  $0,1\text{--}20\text{ МГц}$  (96 каналов) с 2007 г. Наблюдения проводились под зенитным углом  $60^{\circ}$  при ширине диаграммы направленности антенны  $1,5^{\circ}$  по уровню  $-3\text{ дБ}$ . Время измерений составляло 1-3 часа в зависимости от погодных условий. Калибровка спектрометра выполнялась по внешним чернотельным излучателям, один из которых находился при комнатной температуре, а второй охлаждался жидким азотом.

Использованные в анализе данные мониторинга озона – 2096 высотных дневных профилей с шагом 1 км для 9 месяцев трех сезонов 1996-2017 гг. (с сентября по май) разделены на два 11-летних ансамбля (1169 профилей в 1996-2006 гг. и 927 – в 2007-2017 гг.). В каждом из этих «декадных» ансамблей выделены подансамбли для каждого из 9 месяцев.

## 2. Методы восстановления и статистического анализа профилей озона.

Соотношение между яркостной температурой теплового радиоизлучения и высотным профилем объемного отношения смеси (относительного содержания) озона  $U(h)$  после вычитания вклада других атмосферных составляющих может быть представлено в виде интеграла

$$T_B(f) = \int_0^{\infty} U(h) K(U, f, \theta, h) dh, \quad (1)$$

где  $\mathbf{K} = K(U, f, \theta, h)$  – нелинейное ядро уравнения (1),  $f$  и  $\theta$  – частота и угол приема излучения. Для решения (1) был использован разработанный в [6] и успешно примененный в [7, 8] итерационный алгоритм, в котором решение на каждом шаге итерационного процесса ищется методом обобщенной невязки Тихонова [9].

Для описанных выше ансамблей профилей  $U(h)$ , восстановленных из измеренных спектров, были вычислены различные выборочные статистические параметры: средние профили объемного отношения смеси озона (далее «профили озона»)  $\langle U(h) \rangle$ , профили их дисперсий  $\sigma^2(h) = \langle [U(h) - \langle U(h) \rangle]^2 \rangle$  и среднеквадратичных отклонений  $\sigma(h)$  (далее «среднеквадратичные вариации» или «вариации»), профили плотности вероятности отклонений от среднего профиля  $P(U(h) - \langle U(h) \rangle)$ , межвысотные ковариационные функции  $B(h_1, h_2) = \langle [U(h_1) - \langle U(h_1) \rangle][U(h_2) - \langle U(h_2) \rangle] \rangle$  и корреляционные функции  $R(h_1, h_2) = B(h_1, h_2) / \sqrt{B(h_1, h_1)B(h_2, h_2)}$ . Для интервалов, много меньших характерного времени сезонных вариаций, вычислены временные ковариационные функции  $B_t(h, \tau) = \langle [U(h, t) - \langle U(h) \rangle][U(h, t + \tau) - \langle U(h) \rangle] \rangle$  и

корреляционные функции  $R_i(h, \tau) = B_i(h, \tau) / \sigma^2(h) = B_i(h, \tau) / B(h, h)$ , а также их частотные спектры  $S_B(h, f) = \int_{\Delta\tau} B_i(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau$ ,  $S_R(h, f) = \int_{\Delta f} R_i(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau$ .

Был развит метод вычисления «истинных», очищенных от методических погрешностей статистических параметров путем определения коррекции из результатов численного моделирования. В этом моделировании восстановленные профили озона из описанных выше ансамблей данных использовались в качестве исходных, к вычисленным по этим профилям яркостным температурам добавлялась случайная нормально распределенная ошибка с такой же дисперсией, как при восстановлении исходных профилей. Далее решалась обратная задача, и на основе сравнения с такими вторично восстановленными профилями вычислялись статистические параметры полученных ошибок моделирования, используемые для коррекции. В результате «истинные» статистические параметры ансамблей определялись из соотношений:

$$\langle U_0(h) \rangle = \langle U(h) \rangle - \Delta U(h), \quad (2)$$

$$B_0(h_1, h_2) = B(h_1, h_2) - B_{U\delta U}(h_1, h_2) - B_{U\delta U}(h_2, h_1) - B_{\delta U}(h_1, h_2),$$

$$\sigma_0^2(h) = B_0(h, h) = \sigma^2(h) - 2B_{U\delta U}(h, h) - \sigma_{\delta U}^2(h),$$

$$R_0(h_1, h_2) = B_0(h_1, h_2) / \sqrt{B_0(h_1, h_1)B_0(h_2, h_2)}, \quad B_{i0}(h, \tau) = B_i(h, \tau) - B_{\delta U}(h, h)\delta(\tau),$$

$$R_{i0}(h, \tau) = B_{i0}(h, \tau) / B_{i0}(h, 0),$$

$$S_{B0}(h, f) = \int_{\Delta\tau} B_{i0}(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau,$$

$$S_{R0}(h, f) = \int_{\Delta\tau} R_{i0}(h, \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau,$$

в которые входят систематическая ошибка вторично восстановленных профилей  $\Delta U$ , а также автоковариационные  $B_{\delta U}$  и смешанные  $B_{U\delta U}$  ковариационные функции их случайных ошибок  $\delta U$ . Конечно, «истинные» параметры, определяемые из (2), тоже содержат определенную ошибку, но все же методическая погрешность в них сильно подавлена, по крайней мере, в

интервале высот 20-50 км, где ошибки восстановления профилей много меньше их вариаций. На рис. 1 представлены оценки точности восстановления высотного профиля озона в сравнении со среднеквадратичными отклонениями для суточных вариаций, полученные при усреднении данных для двух месяцев (октября и декабря) по всем годам наблюдений (1996-2017 гг.).

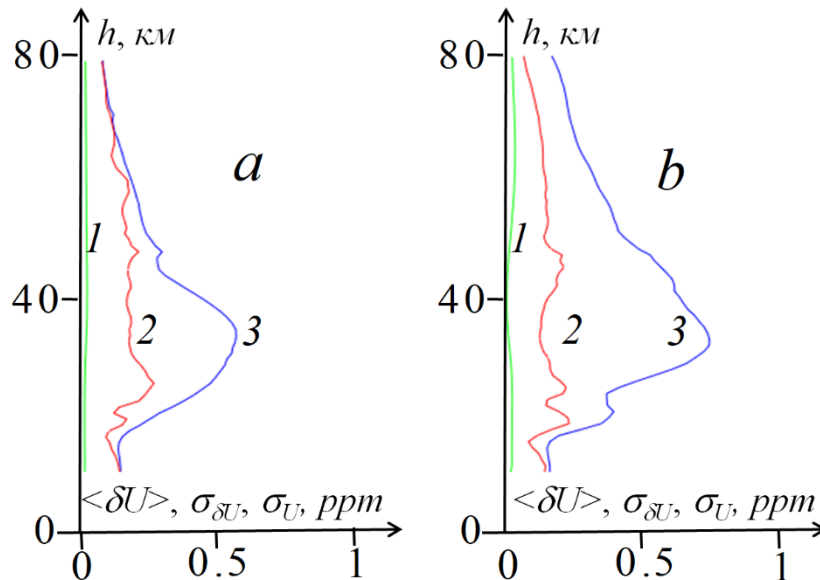


Рис. 1. Погрешности восстановления профиля озона и его среднеквадратичные вариации. а) октябрьские данные 1996-2017 гг.; б) декабрьские данные.

1 – систематические ошибки; 2 – среднеквадратичные ошибки;  
3 – среднеквадратичные отклонения от среднего профиля (вариации).

Как можно видеть, систематические ошибки метода восстановления профиля малы. Среднеквадратичные отклонения в пределах точности оценок не зависят от сезонного ансамбля, и в интервале 20-50 км практически не зависят от высоты и оказываются существенно меньше естественных вариаций профиля озона.

### 3. Результаты статистического анализа.

На рис. 2 показаны высотные профили озона в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, полученные из измерений для двух 11-летних периодов (декад) наблюдений.

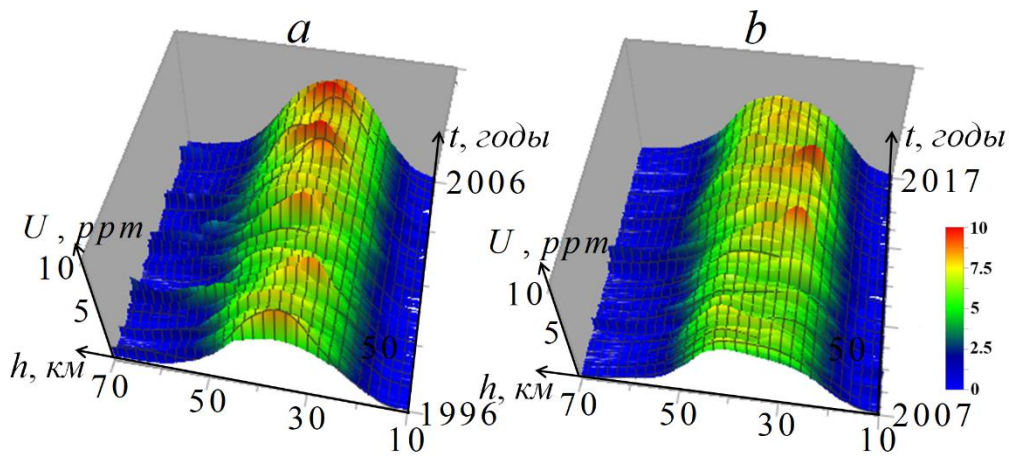


Рис. 2. Ансамбли профилей озона над Москвой. а) профили 1996-2006 гг.; б) профили 2007-2017 гг.

На рис. 2 можно видеть, различия представленных распределений: значения максимумов профилей для декады 2007-2017 гг. на рис. 2б в целом несколько ниже, а сами профили выглядят более сглаженными по сравнению с распределением для декады 1996-2006 гг. на рис. 2а.

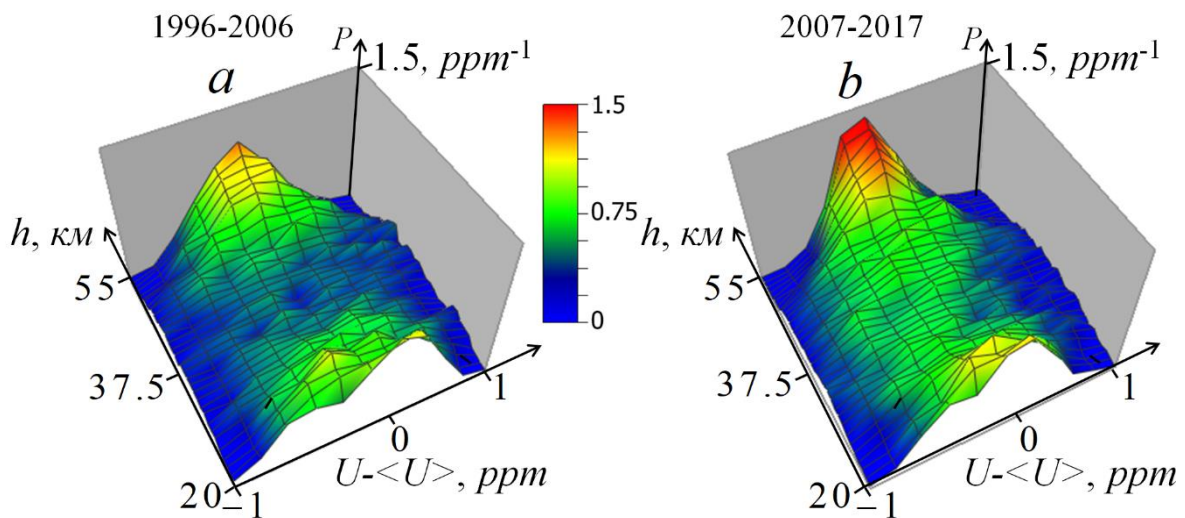


Рис. 3. Распределения плотности вероятности отклонений профилей озона от среднего распределения. а) ансамбль 1996-2006 гг.; б) ансамбль 2007-2017 гг.

На рис. 3 показаны распределения плотности вероятности отклонений профилей озона от среднего значения. Можно видеть, что это распределение стало существенно уже в декаде 2007-2017 гг., что означает уменьшение изменчивости озоносферы. Распределения имеют гауссообразную форму и, как можно было ожидать, они имеют наибольшую ширину на высотах вблизи максимума озонного слоя.

На рис. 4 представлена сезонная динамика среднемесячных профилей озона с сентября (9-й месяц) по май (5-й месяц), усредненных для каждого месяца по всем годам каждой из двух декад наблюдений.

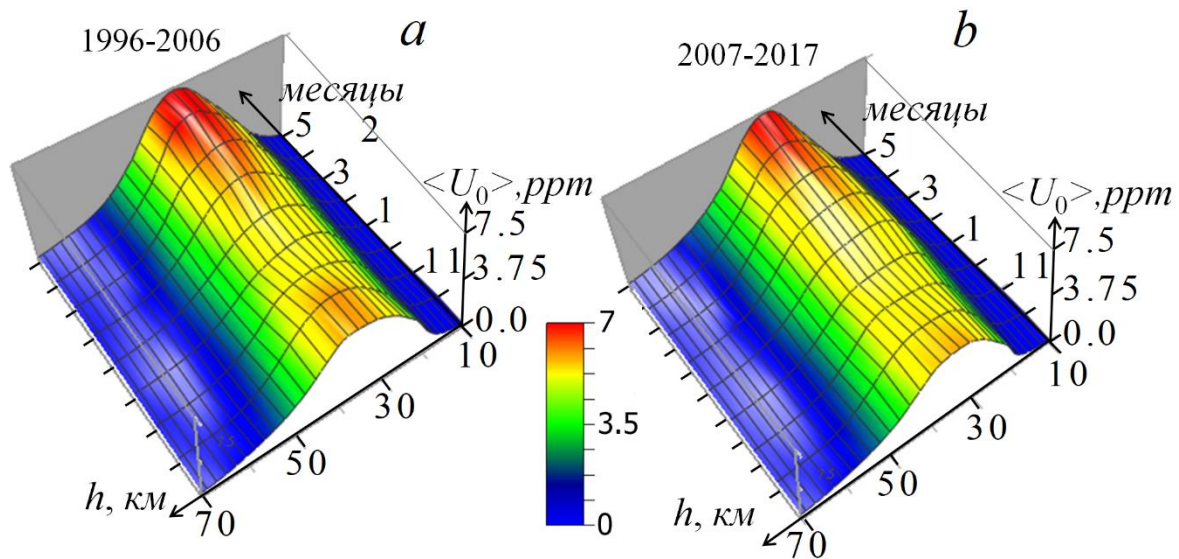


Рис. 4. Сезонная динамика среднемесячных профилей озона с сентября (9-й месяц) по май (5-й месяц) для декад 1996-2006 гг. (a) и 2007-2017 гг. (b).

Хорошо виден годовой ход среднемесячных профилей озона с понижениями его содержания в холодный период, причем отмеченное на рис. 2b сглаживание максимумов и расплывание профилей в 2007-2017 гг. по сравнению с 1996-2006 гг. более отчетливо проявляется в среднемесячных профилях в холодные месяцы 2007-2017 гг. (рис. 2b).

На рис. 5 представлена сезонная динамика среднемесячных вариаций профилей озона с сентября (9-й месяц) по май (5-й месяц), полученных путем усреднения данных для каждого месяца по годам каждой из двух декад наблюдений. Видно, что для обеих декад наблюдений вариации максимальны в холодные месяцы с декабря по март.



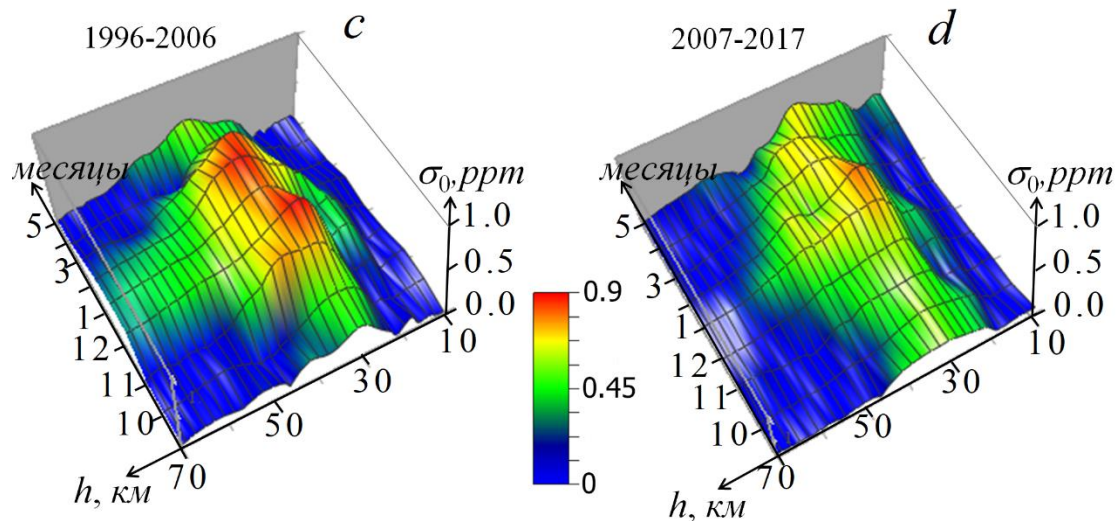


Рис. 5. Сезонная динамика среднемесячных вариаций профилей озона с сентября (9-й месяц) по май (5-й месяц) для 1996-2006 гг. (а) и 2007-2017 гг. (б).

На рис. 6 показаны разности (тренды) среднемесячных профилей и вариаций озона, приведенных на рис. 4, 5 (данные для 1996-2006 гг. вычтены из данных для 2007-2017 гг.).

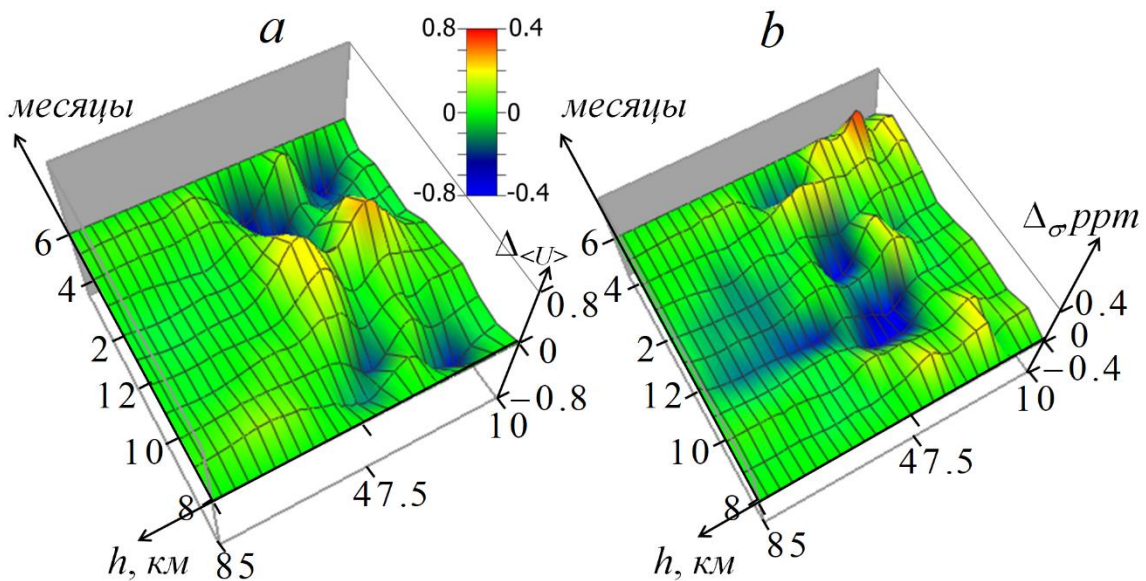


Рис. 6. Тренды (разности) среднемесячных профилей озона (а) и среднемесячных вариаций профилей озона (б) между декадами 1996-2006 гг. и 2007-2017 гг.

Статистически значимые (по критерию 3 сигма) декадные тренды среднемесячных профилей и вариаций концентрации озона являются основными результатами анализа. На рис. 6а можно видеть существенное различие трендов в области максимума профилей (высоты около 35 км) и в областях выше и ниже

этого максимума. Наиболее значительное изменение средних профилей – их возрастание выше и ниже максимума в зимние месяцы 2007-2017 гг. (с наибольшим ростом около 13% относительно 1996-2006 гг. в январе). Интересно отметить, что высотное распределение тренда профиля с двумя максимумами в январе в целом сохраняется и в другие месяцы (при уменьшении их амплитуды и сдвиге по высоте). Самым неожиданным результатом является хорошо видное на рис. 6b значительное уменьшение вариаций содержания озона в зимний период выше 30 км с максимальным падением на 33 км в декабре и на 39 км в феврале (на 38 и 46% относительно средних вариаций в 1996-2006 гг.).

Межвысотная  
ковариационная функция

Межвысотная  
корреляционная функция

Временная  
ковариационная функция

Спектр временной  
ковариационной функции

Временная  
корреляционная функция

Спектр временной  
корреляционной функции

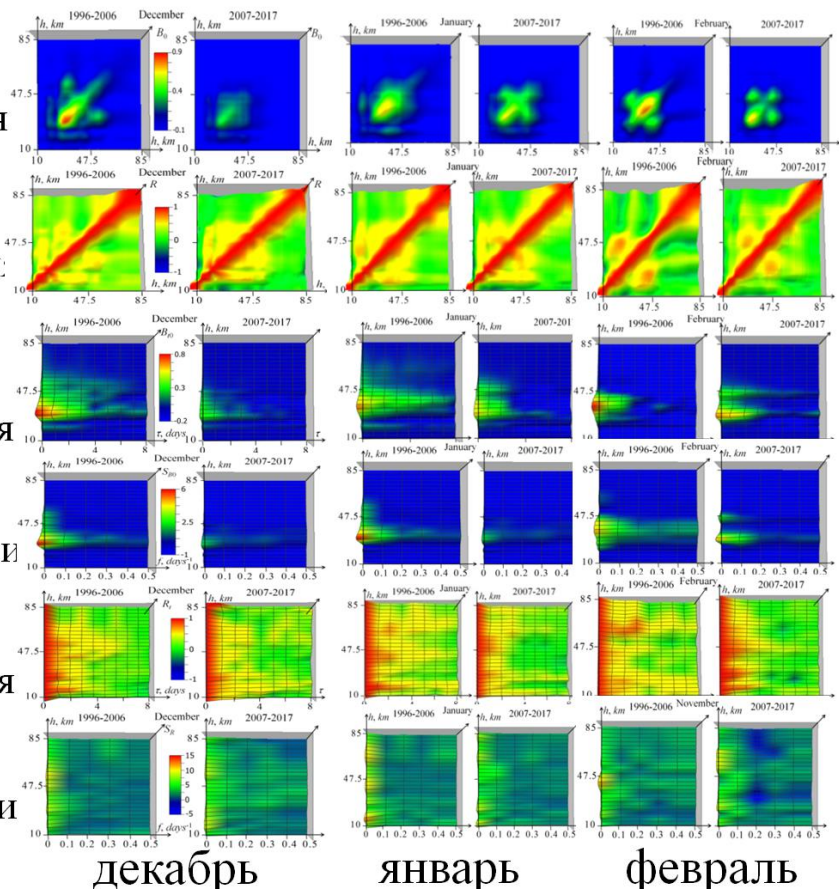


Рис. 7. Межвысотные и временные ковариационные и корреляционные функции, а также частотные спектры временных функций в зимние месяцы.

Для каждого месяца на отдельных рисунках приведены результаты для 1996-2006 гг. и 2007-2017 гг.

Временные корреляционные функции могут использоваться для статистического прогноза текущего профиля озона по профилям, которые наблюдались в предшествующие дни, на основе формул линейной регрессии.

Эти оценки могут быть также использованы как более точное по сравнению со средним профилем нулевое приближение в алгоритмах решения нелинейной обратной задачи. Для однодневного прогноза профиля озона  $U_o(h, t)$  по профилю в предшествующий день  $U_o(h, t-1)$  справедлива формула бинарной линейной регрессии:

$$U_o(h, t) = \langle U_o(h) \rangle + R_{t0}(h, \tau = 1)(U_o(h, t-1) - \langle U_o(h) \rangle), \quad (3)$$

где  $t$  – текущее время, а  $\tau$  – время, на которое дается прогноз (в сутках). Отношение среднеквадратичной ошибки  $\sigma_{res}(h)$  прогноза (3) к величине среднеквадратичных вариаций профиля

$$\sigma_{res}(h) / \sigma_o(h) = 1 - R_{t0}^2(h, \tau = 1), \quad (4)$$

характеризует относительную погрешность прогноза. На рис. 8 представлены распределения этой погрешности в процентах для всех месяцев каждого 11-летнего периода анализа.

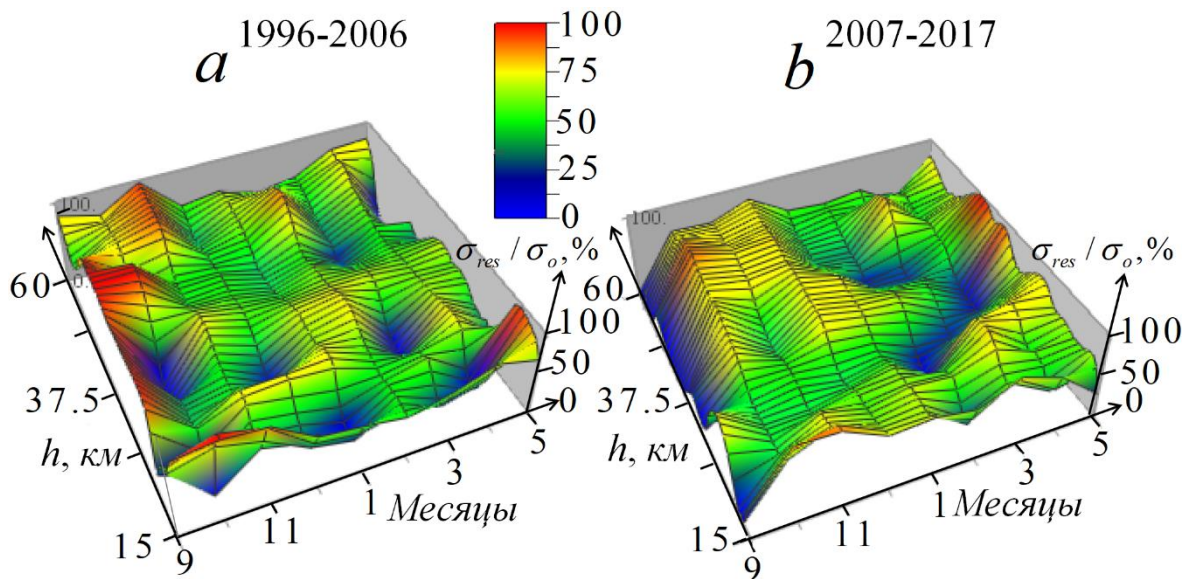


Рис. 8. Погрешность однодневного статистического прогноза профиля озона по данным измерений в предшествующий день: *a* – ансамбль 1996-2006 гг.; *b* – ансамбль 2007-2017 гг.

На рис. 8 видно, что средняя погрешность однодневного прогноза составляет в среднем 50-70% от естественных вариаций, то есть ежедневные измерения существенно уточняют статистический прогноз (3). Можно отметить, что высотные распределения среднемесячных ошибок прогноза довольно



разнообразны в каждой из двух декад анализа и различаются при сравнении соответствующих месяцев этих двух периодов – за исключением областей выше и ниже озонного максимума в феврале-марте, где наблюдаются минимумы погрешности, достигающие до значений около 15%.

Обнаруженные тренды среднемесячных корреляционных параметров, представленных на рис. 7, проявляются и в декадных трендах, полученных по статистическим параметрам, усредненным по всем девяти месяцам анализа каждой из декад. Особенно наглядно декадные тренды корреляционных параметров проявляются в усредненных межвысотных ковариационных функциях, показанных на рис. 9.

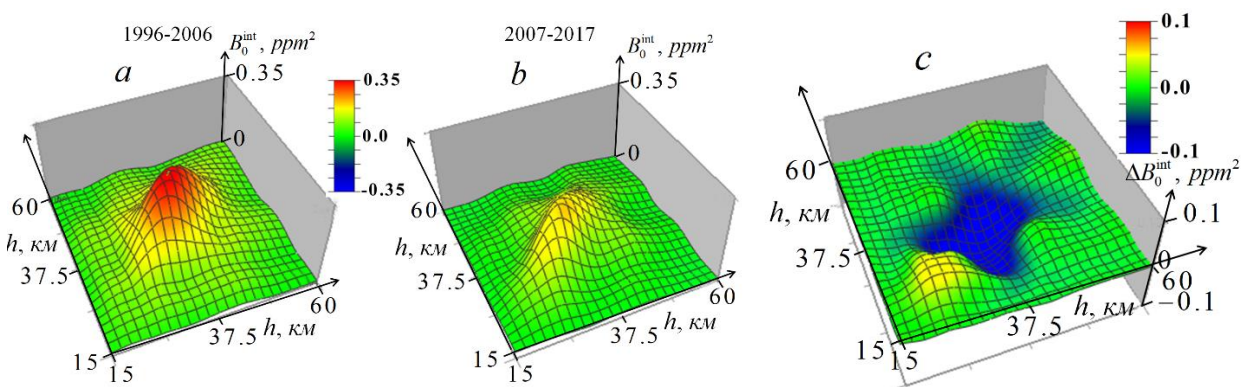


Рис. 9. Межвысотные усредненные по всем месяцам (декадные) ковариационные функции  $B_0^{\text{int}}$ : а) ковариационная функция для 1996–2006 гг.; б) ковариационная функция для 2007–2017 гг.; в) разность функций (тренд), где, как и ранее, функция для 1996-2006 гг. вычтена из функции для 2007-2017 гг.

В связи с проблемой истощения озонного слоя, исследования в мировой науке сфокусированы на долгосрочных трендах профилей и интегрального по высоте содержания озона (см. обзор в [10]). На рис. 10 показаны профили декадных средних значений озона и его среднеквадратичных вариаций, полученные по статистическим параметрам рис. 4, 5, усредненным по всем девяти месяцам анализа каждой из декад.

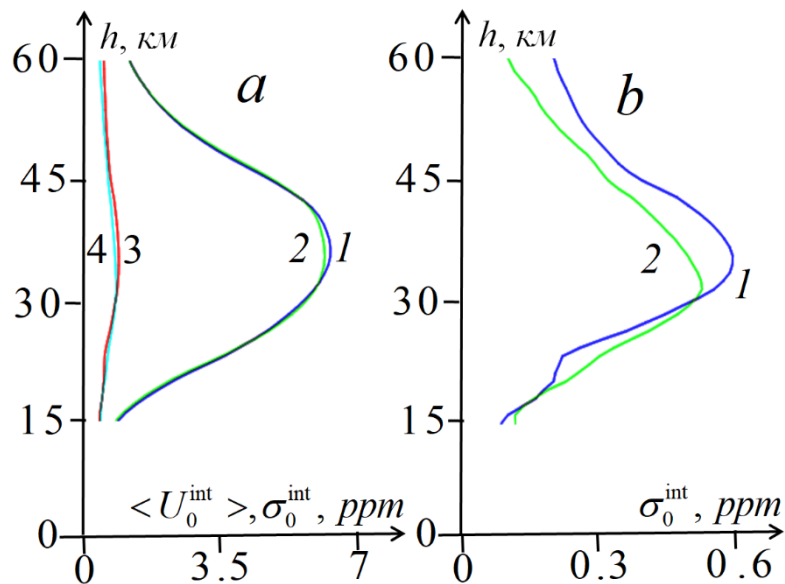


Рис. 10. Профили декадных средних значений и среднеквадратичных вариаций отношения смеси озона: *a)* 1 – профиль декадных средних значений отношения смеси за 1996-2006 гг., 2 – профиль за 2007-2017 гг., 3 – профиль декадных среднеквадратичных вариаций за 1996-2006 гг., 4 – среднеквадратичные вариации за 2007-2017 гг.; *b)* 1 – профиль декадных вариаций за 1996-2006 гг., 2 – вариации за 2007-2017 гг. (те же, что и на рис. 10*a*).

На рис. 10*a* видно, что довольно сильные изменения среднемесячных профилей озона между двумя декадами, заметные на рис. 4, существенно сглаживаются при усреднении по месяцам, и статистическая значимость этих отклонений соответственно уменьшается. Как следствие, среднее интегральное содержание озона выше 20 км осталось практически неизменным (4,61 г/м<sup>2</sup> в 1996–2006гг. и 4,58 г/м<sup>2</sup> в 2007–2017).

В отличие от профилей озона, усредненные по месяцам профили вариаций озона остаются существенно различными для двух деkad и демонстрируют значимое уменьшение изменчивости содержания озона выше 30 км. Соответствующие декадные тренды профилей отношения смеси озона и их вариаций между периодами 1996-2006 и 2007-2017 гг., полученные путем усреднения среднемесячных трендов, показанных на рис. 6, по всем девяти месяцам анализа, представлены на рис. 11.

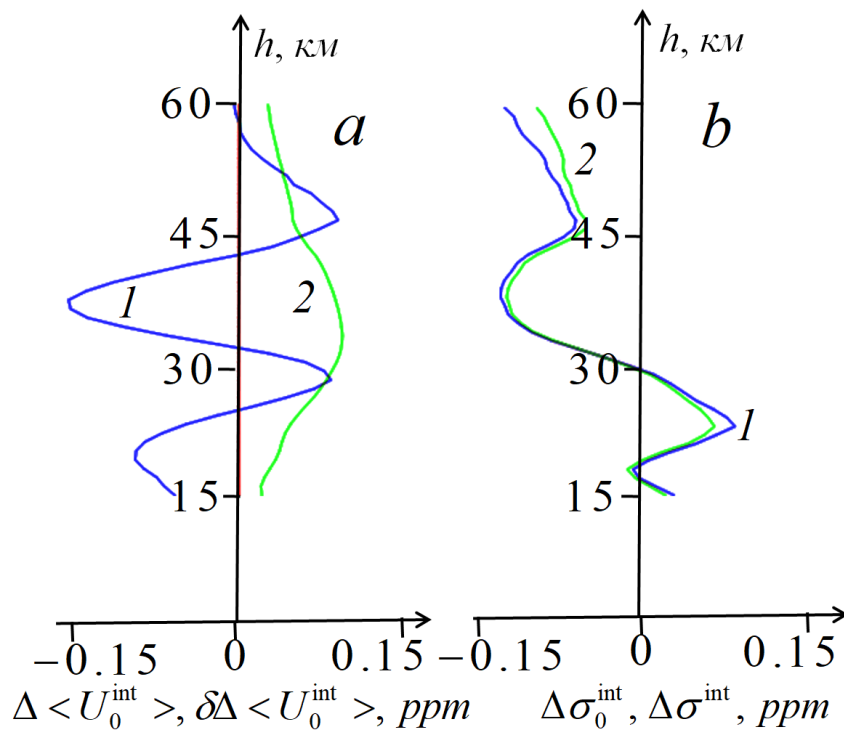


Рис. 11. Декадные тренды средних профилей и вариаций содержания озона. *a)* 1- тренд среднего профиля озона, 2 – выборочная погрешность; *b)* 1 – тренд профиля вариаций, очищенных от методических ошибок, 2 – тренд вариаций без коррекции ошибок.

В тренде среднего профиля озона имеются максимумы выше и ниже высоты максимума озонного слоя и минимум в области этого максимума (рис. 11*a*), а в тренде вариаций относительного содержания озона (рис. 11*b*) видно существенное падение на высотах больше 30 км с выраженным минимумом на 38 км и рост ниже 30 км с максимумом на 23 км. Также, на рис. 11 можно более отчетливо, чем на рис. 10, видеть, что величины тренда среднедекадного профиля озона и их статистическая значимость оказываются существенно меньше, чем у трендов среднемесячных профилей на рис. 6*a*, тогда как тренд среднедекадных вариаций демонстрирует высокую статистическую значимость.

#### 4. Обсуждение результатов.

Наиболее содержательное сравнение с ранее опубликованными данными можно сделать для результатов, полученных на ближайшей к Москве (55.70°N, 37.57°E) станции наземного радиометрического зондирования в Берне (46.57°N, 7.26°E), где регулярные наблюдения профиля озона велись с использованием

микроволнового радиометра GROMOS на той же частоте 142,2 ГГц в 1997-2015 гг. [10]. Сравнение наших декадных трендов средних интегральных профилей озона с данными швейцарского Института прикладной физики (см. fig. 9 в [10]) за 1997–2015 гг. представлено на рис. 12.

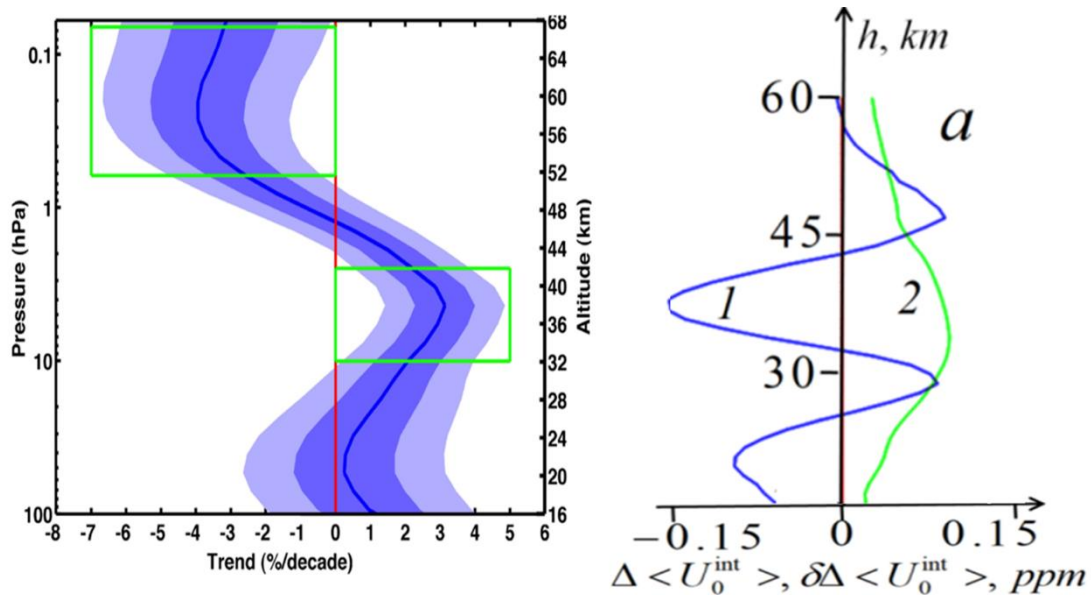


Рис. 12. Декадные тренды средних профилей озона. *a)* декадный тренд в Берне: синяя линия – тренд среднего профиля, темно-синяя область – зона внутри стандартного отклонения, бледно-синяя – зона двух стандартных отклонений, зеленые прямоугольники – зоны 95% вероятности; *b)* 1 – тренд среднего профиля в Москве, 2 – выборочная погрешность.

Декадный тренд профиля озона за 1997-2015 гг., полученный по данным GROMOS, составил  $3,14 \pm 1,71\%$  на 37 км и  $-3,94 \pm 2,73\%$  на 59 км [10]. В целом этот тренд соответствует данным [1] ниже 45 км, но имеет совершенно другой вид выше этой высоты. Наши результаты на этих высотах составляют  $-2.6 \pm 1.5\%$  на 37 км и  $-0.5\% \pm 3.1\%$  на 59 км. Полученные высотные распределения декадных трендов в обоих случаях являются знакопеременными, но существенно различаются по своему виду. Данные WMO ([1], Table 2.4) дают декадный тренд озона  $3.9 \pm 1.3\%$  на 40 км для средних широт ( $35-60^\circ\text{N}$ ) за период 2000-2013 гг.

Сравнение массива данных на рис. 2 с аналогичными данными из [10] показывает, что сезонные вариации в Берне менее выражены, чем вариации озонного профиля над Москвой. Вероятно, основной причиной этого различия является более низкое широтное положение Берна относительно Москвы ( $47^\circ\text{N}$

против 56N для Москвы), так что не все сдвиги стратосферного полярного вихря к Европе, приводящие к существенному истощению озонного слоя в холодные месяцы, наблюдаются в Берне.

При сравнении результатов настоящей работы с данными [1, 10] и других исследований необходимо также учитывать, что декадные тренды профиля озона рассчитывались нами не для 12, а только для 9 месяцев наблюдений (с сентября по май). Для летних месяцев (июнь-август) количество дней наблюдений было недостаточно для надежного статистического анализа.

Среди многочисленных исследований озоносферы представленные в данной работе результаты измерений представляют особый интерес, поскольку их начало в 1996 г. практически совпало с началом восстановления, примерно с 1997 г., озонного слоя в верхней стратосфере. Как отмечено в представительном обзоре [1], с 1997 г. декадный тренд возрастания интегрального содержания озона в столбе атмосферы в средних и высоких широтах был незначительным и положительным (около 1%) с большими межгодовыми вариациями около 5%. Результаты наших 22-летних исследований показали, что декадный тренд содержания озона в столбе атмосферы выше 20 км над Москвой также был незначительным (статистически незначимым), но отрицательным – около –0.7%.

Наиболее неожиданным и нуждающимся в объяснении результатом проведенного статистического анализа является обнаружение резкого уменьшения изменчивости (вариаций и ковариационных параметров) профиля озона выше 30 км в 2007–2017 гг. по сравнению с 1996–2006 гг. 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 в 2007–2017 гг. по сравнению с 23-м циклом в 1996–2006 гг. Действительно, анализируемый 22-летний период почти точно совпал с двумя последними 11-летними циклами солнечной активности, показанными на рис. 13.



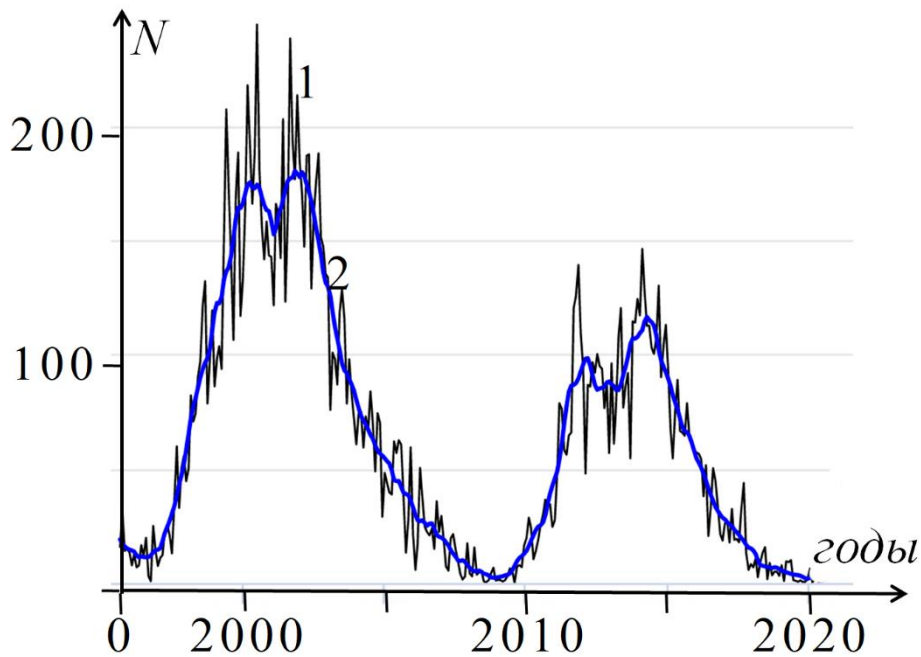


Рис. 13. 23-й и 24-й циклы солнечной активности: 1 — среднемесячное число солнечных пятен; 2 — сглаженная кривая.

Можно видеть, что солнечная активность в 24-м цикле была почти вдвое меньше, чем в 23-м. Это могло привести к отмеченному выше небольшому снижению содержания озона в вертикальном столбе атмосферы в 24-м цикле по сравнению с 23-м. В [1] влияние вариаций солнечной активности на содержание озона в столбе атмосферы оценивается в 1–2% с максимумом в полярных широтах. Однако следует отметить, что связанные с солнечной активностью вариации профилей содержания озона могут быть более значительны, чем вариации содержания озона в столбе атмосферы. Исследования, проведенные в [11] на основе анализа влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере и нижней мезосфере по данным спутниковых измерений с помощью приборов SBUV/SBUV2 в 1978–2003 гг., показали, что высотные максимумы чувствительности озона к 11-летнему солнечному циклу отмечены в верхней окрестности стратопauзы (50–55 км), в средней стратосфере (35–40 км) и нижней стратосфере (ниже 25 км). Максимальные изменения содержания озона в солнечном цикле, до 10% и более, отмечены в зимне-весенние периоды в полярных областях. Согласно [12], эти вариации составляли 6,8–9,6% на высотах 22–31 км в области антарктической озонной дыры. Так что

эффект снижения солнечной активности в 24-м цикле можно рассматривать как одну из причин уменьшения вариаций озона выше 30 км в декаде 2007–2017 гг.

Более существенный вклад в наблюдаемые тренды может быть связан с межгодовыми изменениями крупномасштабной стратосферной динамики в холодные сезоны (для краткости называемые далее «зимами»), в частности, с характером и сроками внезапных стратосферных потеплений, сильно влиявших на озон в средней стратосфере над Москвой во время зим с 1995–1996 по 2014–2015 гг. [13]. Анализ геофизических параметров (амплитуды планетарных волн  $n = 1$  and  $n = 2$ , геопотенциальной высоты в центре стратосферного полярного вихря, скорости зонального ветра и средней зональной температуры на широтах  $85^\circ\text{N}$  и  $60^\circ\text{N}$ ) на уровне давления 10 мбар (высоты около 30 км) позволил разбить зимы на четыре группы с существенно различным характером динамики стратосферы.

К группе I отнесены зимы, когда стратосферный полярный вихрь возрастает в ноябре и декабре и часто сдвинут к Европе в эти месяцы, так что воздушные массы с низким содержанием озона внутри вихря часто появляются над Москвой. В результате отношение смеси озона на уровне 10 мбар (обозначим его  $U_I$  для зим этой группы) падает в декабре до значений около 4,5 ppm (здесь и далее используются средние по группе зим значения). В январе происходит мажорное среднезимнее стратосферное потепление, вихрь деформируется и заполняется богатым озоном воздухом из низкоширотных областей. Это приводит к резкому возрастанию  $U_I$  до 6–6.5 ppm над Москвой в январе и феврале с последующим плавным ростом в марте и апреле [13].

Наоборот, в зимы группы II глубокий и долгоживущий полярный вихрь формируется несколько позже и редко сильно сдвигается к Европе, так что отношение смеси озона в стратосфере над Москвой в ноябре и декабре уменьшается в среднем медленнее, чем для зим группы I, с типичным значением в декабре 5–5,5 ppm на 10 мбар (для зим группы II назовем эту величину  $U_{II}$ ). Это значение держится до февраля, после чего содержание озона медленно растет до 6,2–6,7 ppm. В результате в декабре и в начале января разность  $U_I - U_{II}$

оказывается отрицательной и достигает значений около  $-1$  ppm. Напротив, позже в январе и в начале февраля эта разность становится положительной и достигает  $1$  ppm и более, так что результирующий размах вариаций разности  $U_I - U_{II}$  составляет типично около  $2$  ppm [13].

Для зим группы Ia вариации содержания озона сходны с зимами группы I, но стратосферное потепление и последующий переход от низких значений отношения смеси озона в средней стратосфере к высоким происходят позднее, в феврале. В результате отрицательные значения разности  $U_I - U_{II}$  держатся дольше – и в январе, и в феврале, а положительные значения разности  $U_I - U_{II}$ , возникающие после стратосферного потепления в феврале, оказываются меньше и держатся более короткое время.

В группу III включены зимы с неглубоким стратосферным полярным вихрем и минорным стратосферным потеплением в декабре. Характер вариаций озона в стратосфере над Москвой сходен с их динамикой для зим группы II с нерегулярными, но более-менее однородными вариациями разности  $U_I - U_{II}$  в интервале от  $-0,6$  до  $0,8$  ppm на уровне  $10$  мбар с октября по май.

Предварительные оценки среднемесячных вариаций озона на уровне  $10$  мбар для групп зим I, Ia, II, и III показывают, что вариации в них в целом возрастают от минимума до максимума в порядке расположения в списке, так что для зим групп II и III содержание озона над Москвой было наиболее волатильным из-за многократных кратковременных сдвигов полярного вихря к Европе и обратно к Северному полюсу. Например, в наиболее турбулентную зиму 1996-1997 гг. с ноября по апрель было  $12$  таких сдвигов. На рис. 14 представлена классификация зим с 1995-1996 по 2016-2017 гг. по описанным выше типам [13].

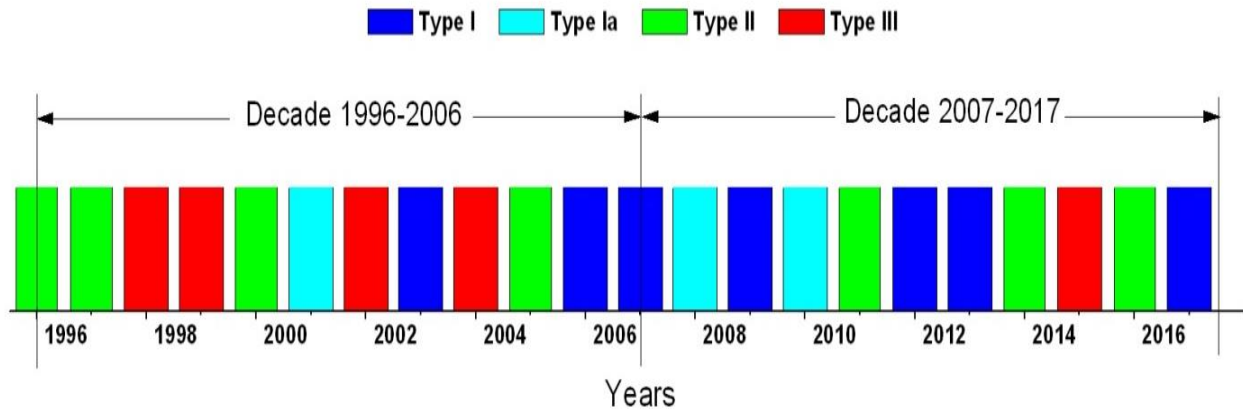


Рис. 14. Типы зим за период наблюдений.

Тип I – зимы с мажорным среднезимним потеплением в январе; в декабре полярный вихрь сдвинут к Европе;

Тип Ia – зимы, сходные с типом I, но среднезимнее потепление происходит в феврале;

Тип II – зимы без сильного среднезимнего стратосферного потепления, полярный вихрь глубокий и долгоживущий, с центром около Северного полюса;

Тип III – зимы с неглубоким стратосферным полярным вихрем и слабым стратосферным потеплением в декабре.

Чтобы понять некоторые особенности изменения среднемесячных профилей озона и их суточных вариаций между декадами 1996-2006 и 2007-2017 гг. (см. рис. 3-6, 11) сравним для этих декад число зим с низким и высоким среднемесячным содержанием озона, а также с низким и высоким уровнем среднемесячных суточных вариаций.

В декаде 1996-2006 гг. в январе было 2 зимы из группы I с высоким содержанием озона и 1 зима из группы Ia с низким содержанием озона в средней стратосфере. В декаде 2007-2017 гг. соответствующие числа были 5 и 2. Это значит, что в январе среднее содержание озона в декаде 2007-2017 гг. было больше, чем в декаде 1996-2006 гг., что может объяснить появление самого высокого максимума в междекадном тренде среднемесячных профилей озона на рис. 6а для января на высотах немного ниже 30 км.

Аналогично, можно найти объяснение для наблюдаемого междекадного тренда среднемесячных вариаций. Заметим, что малые значения этих вариаций наблюдались для зим группы I (за исключением января) и зим группы Ia (за

исключением февраля). В указанные месяцы происходили стратосферные потепления, сопровождавшиеся сильными возмущениями профилей озона. Напротив, большие среднемесячные значения суточных вариаций профилей получались для зим групп II и III, а также для упомянутых январей из группы I и февралей из группы Ia. Используя эти простые правила и данные рис. 13, получаем значительное возрастание числа низковолатильных месяцев и соответствующее уменьшение числа высоковолатильных месяцев в декаде 2007-2017 гг. в декабре и феврале, которые проявились в возникновении двух глубоких минимумов на высотах 35-40 км, хорошо видных на рис. 6b. С другой стороны, в январе для декады 1996-2006 гг. число низко- и высоковолатильных вкладов было близким к их числу для декады 2007-2017 гг. Это может объяснить небольшую величину тренда среднемесячных вариаций озона в средней атмосфере в январе (см. рис. 6b).

Рассмотренный выше подход можно применить и к объяснению существенной трансформации распределения плотности вероятности отклонений от среднего профиля озона между двумя декадами на рис. 3. Бимодальный характер вариаций озонного профиля, связанный с многократными кратковременными сдвигами полярного вихря к Европе и обратно к Северному полюсу является типичным для зим групп II и III, которые преобладали в декаде 1996-2006 гг. (см. рис. 14). Поэтому в холодные месяцы в стратосфере над Москвой воздушные массы умеренных широт с достаточно высоким содержанием озона часто чередовались с бедным озоном воздухом полярного вихря. Некоторые признаки присутствия этой бимодальности с размахом 1-2 ppm можно видеть на рис. 3a для высот в области максимума озонного слоя на 30-35 км. И наоборот, в декаде 2007-2017 гг. превалировали зимы групп I и Ia, во время которых вариации озонного профиля наблюдались реже, а их амплитуды, в целом, были меньше. Поэтому распределение плотности вероятности отклонений озонного профиля от среднего в декаде 2007-2017 гг. оказалось существенно более узким (см. рис 3б).

Скорее всего, выявленные междекадные тренды профилей озона и их вариаций в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, как среднемесячные, так и усредненные по всем месяцам в декадах, связаны с кумулятивным эффектом солнечной активности, изменений в содержании и пространственном распределении озonoактивных газов, изменениями в глобальной динамике и температурном режиме стратосферы, а также с возрастанием содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Влияние атмосферных аэрозолей, связанных с извержением вулкана Эйяфьядлайекюдль в 2010 г. и лесных пожаров в последние годы был пренебрежимо мал по сравнению с негативными последствиями для атмосферы после масштабных извержений вулканов Эль Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г., однако эффект от них также практически исчез до 1996 г. [14], когда в Москве начались регулярные микроволновые измерения стратосферного озона.

## **Заключение**

Приводятся результаты статистического анализа ансамблей высотных профилей объемного отношения смеси озона в стратосфере и нижней мезосфере над Москвой, восстановленных по данным наземного радиометрического микроволнового зондирования, проводившегося в ФИАН в период 1996-2017 гг., практически совпадающий с 23-м и 24-м 11-летними циклами солнечной активности. Начало регулярных микроволновых измерений озона в Москве также почти точно совпало с началом постепенного восстановления защитного озонного слоя (1996-1997 гг.). Среднемесячные (с сентября по май) статистические параметры озонных профилей, усредненные за 2007-2017 гг., значительно отличаются от параметров, усредненных за 1996-2006 гг. Основным, и неожиданным, результатом является резкое уменьшение изменчивости озоносферы в 2007-2017 гг. на высотах больше 30 км в холодные месяцы (с ноября по март). Максимальное уменьшение среднемесячных вариаций озонного профиля на 46% обнаружено на высоте 39 км для февральских ансамблей данных. Среднедекадные отличия вариаций, полученные усреднением по всем 9 месяцам анализа, показали тот же тренд с

максимальным падением 25% на высоте 38 км. Значительные междекадные различия обнаружены и в среднемесечных профилях содержания озона, в межвысотных и временных ковариационных и корреляционных функциях, а также в их частотных спектрах. Однако существенные междекадные тренды профилей озона для отдельных месяцев существенно сглаживаются в тренде, полученном путем их усреднения; в результате такой интегральный тренд оказался существенно менее статистически значимым: обнаружено лишь уменьшение среднедекадного профиля озона на высоте 19 км ( $-5.7 \pm 1.5\%$ ) и вблизи максимума озонного слоя на высоте 37 км ( $-2.6 \pm 1.5\%$ ) при его увеличении на высотах 28 км ( $1.7 \pm 1.7\%$ ) и 47 км ( $2.5 \pm 1.7\%$ ) (ниже и выше максимума профиля озона). При этом среднее интегральное содержание озона в столбе атмосферы выше 20 км осталось практически неизменным ( $4.61 \text{ г/м}^2$  для декады 1996-2006 гг. и  $4.58 \text{ г/м}^2$  для декады 2007-2017 гг.). Обсуждаются возможные причины резкого падения изменчивости озона выше 30 км в 2007-2017 гг., связанные со значительным уменьшением солнечной активности в 24-м цикле и большими межгодовыми различиями динамики стратосферы Северного полушария в периоды наблюдений в 1996-2006 и 2007-2017 гг.

Авторы признательны С.В. Соломонову – научному руководителю Лаборатории спектроскопии миллиметровых волн ФИАН, в которой были получены использованные в работе экспериментальные данные.

### Литература

1. David Fahey, Paul A. Newman, John A. Pyle, Bonfils Safari, Martyn P. Chipperfield, et al. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No.58. *World Meteorological Organization*. 2018. 588 p.
2. Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., et al. An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016. *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V.17. №17. P.10675-10690. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>

3. Manney, G.L., Santee, M.L, Rex, M., et al., Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*. 2011. V.478. №7370. P.469-475.  
<https://doi.org/10.1038/nature10556>
4. Соломонов С.В., Розанов С.Б., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н. Спектрорадиометр для дистанционного зондирования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах. *Радиотехника и электроника*. 2000. Т.45. №12. С.1519-1525.
5. Соломонов С.В., Игнатьев А.Н., Кропоткина Е.П., и др. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах. *Приборы и техника эксперимента*. 2009. №2. С.138-144.  
<https://doi.org/10.1134/S0020441209020286>
6. Gaikovich K.P. Tikhonov's Method of the Ground-based Radiometric Retrieval of the Ozone Profile. 1994. *IGARSS'94 Digest*. V.4. P.1901-1903.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399606>
7. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. Определение вертикального профиля атмосферного озона по наземным измерениям излучения в миллиметровом диапазоне. *Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана*. 1999. Т.35. №1. С.86-95.
8. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах. *Известия Высших Учебных Заведений. Радиофизика*. 2011. Т.54. №2. С.113-121. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9274-8>
9. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. *Численные методы решения некорректных задач*. Москва, Наука. 1990.
10. Moreira L., Hocke K., Eckert E., von Clarmann T., and Kämpfer N. Trend analysis of the 20-year time series of stratospheric ozone profiles observed by GROMOS microwave radiometer at Bern. *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V.15 (19). P.10999-  
<https://doi.org/10.5194/acp-15-10999-2015>



11. Груздев А. Н. Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т.54. №5. С.678–684. <https://doi.org/10.7868/S0016794014040178>
12. Grytsai A., Evtushevsky O., Klekociuk A., Milinevsky G., Yampolsky Yu., Ivaniha O., Wang Yu. Investigations of the vertical influence of the 11-year solar cycle on ozone using SBUV and Antarctic ground-based measurements and CMIP6 forcing data. *Atmosphere*. 2020. V.11. №8. P.873-93.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11080873>
13. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н. 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>
14. Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total ozone variations and trends during the period 1979–2014. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. V.28. №6. P.575-584. <https://doi.org/10.1134/S1024856015060196>
15. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979-2014 гг. *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т.28. №9. С.80-809. <https://doi.org/10.15372/AOO20150905>

**Для цитирования:**

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* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.14>