

УДК 519.21

## Сравнение временных рядов интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона

А.В. Невзоров<sup>1</sup>, О.Е. Баженов<sup>1</sup>, А.В. Ельников<sup>2</sup>, В.А. Логинов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Сургутский государственный университет  
628403, г. Сургут, пр. Ленина, 1

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

Представлены подекадно усредненные временные ряды общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском в период 2000–2016 гг., полученные с помощью озонметра М-124 и лидарным методом соответственно. Исследована взаимосвязь между ними. Из временных рядов рассматриваемого периода сформированы годовые ходы в виде подекадных значений (всего 36 точек) исследуемых параметров. Проведен анализ и выявлены отличия и подобия этих временных рядов.

*Ключевые слова:* лазерное зондирование, лидар, аэрозоль, озон, ряды измерений; laser sounding, lidar, aerosol, ozone, measurement series.

### Введение

Аэрозоль и озон являются оптически активными составляющими атмосферы и, следовательно, влияют на климато- и средообразующие факторы (радиационный обмен, фотохимические реакции и др.). Свидетельством актуальности проблемы наблюдений и исследований этих компонентов служат регулярные публикации, посвященные исследованиям озона [1–4] и аэрозоля [5–7] в стратосфере.

В Институте оптики атмосферы СО РАН на Сибирской лидарной станции (СЛС) в г. Томске (56,48° с.ш., 85,05° в.д.) в течение длительного времени ведутся многоплановые и комплексные исследования этих компонентов атмосферы, в том числе и их интегральных характеристик: общего содержания озона (ОСО) и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (ИКОАР).

Наблюдения и исследования ОСО начаты в 1994 г. и продолжаются по настоящее время. Для его измерения используется озонметр М-124, в основе работы которого лежит спектрофотометрический метод [8, 9]; данные об ОСО по всей толще атмосферы архивируются с временным разрешением в одни сутки.

ИКОАР рассчитывается на основе данных лидарного зондирования. Методом калибровки из полученных лидарных сигналов определяется вертикальное распределение коэффициента обратного аэрозольного рассеяния  $\beta_{\pi}^A(H)$  [10]. Интегрирование

полученных значений  $\beta_{\pi}^A(H)$  в диапазоне 15–30 км и дает значение ИКОАР. Лидарные наблюдения за состоянием стратосферного аэрозольного слоя были начаты в 1985 г. [11] и продолжаются по настоящее время. Но отсчеты ряда ИКОАР представляют собой не суточные значения, а средние за декаду. Применение подобного грубого усреднения обусловлено тем, что при наличии плотной облачности лидарное зондирование стратосферных компонентов нереализуемо. Поэтому даже в подекадно усредненных данных ИКОАР в течение года имеются пропуски. Также к пропускам во временном ряде ИКОАР приводят поломки лидарной техники и регламентные работы.

В настоящее время рассматривается возможность стабилизации температуры Земли и приземного воздуха, которая возрастает в результате антропогенных воздействий, с помощью создания искусственного стратосферного аэрозольного слоя, а также обсуждаются возможные негативные последствия этого проекта [12–15]. В том числе возникает вопрос, как этот слой может повлиять на ОСО, поскольку часть озоносферы будет приходиться и на высоты его локализации. Проблемы, связанные с процессами рекомбинации молекул озона аэрозолем, рассматривались и ранее, но для определенных специфических условий состояния стратосферы (озоновая аномалия в Антарктиде, наличие вулканогенного аэрозоля) [16–17].

Результаты исследований в настоящей статье также освещают проблему не в полном объеме, поскольку сравниваются компоненты, локализованные в неодинаковых высотных диапазонах: ОСО является характеристикой всей атмосферы в целом (от земной поверхности до верхней границы атмосферы),

\* Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Андрей Владимирович Ельников (andreyeln@mail.ru); Вадим Андреевич Логинов (dirkloginov@gmail.com).

а ИКОАР отражает содержание аэрозоля в диапазоне высот 15–30 км, на который в Северном полушарии приходится не более 70% атмосферного озона [18, 19].

Необходимые требования для сравнительного анализа временных рядов – их единый временной масштаб и однородность. Первое требование было удовлетворено представлением ряда ОСО подекадными значениями, а второе – выбором для анализа интервала наблюдений 2000–2016 гг., в котором отсутствовали мощные извержения вулканов, приводящие к сильным возмущениям стратосферного аэрозольного слоя и существенной неоднородности ряда ИКОАР.

## Временные ряды и взаимосвязь ИКОАР и ОСО

Временные ряды ОСО и ИКОАР в декадном временном масштабе за период 2000–2016 гг. показаны на рис. 1. Во временном ряде ОСО (рис. 1, *a*) четко проявляются сезонные колебания, обусловленные глобальными циркуляционными процессами. В основном озон формируется в верхней стратосфере тропических широт в холодный период, при усилении этих процессов; горизонтальным (адвективным) движением воздушных масс он переносится с юга на север с постепенным оседанием максимума озонового слоя. Этот фактор доминирует в формировании озоносферы средних широт [20–22].

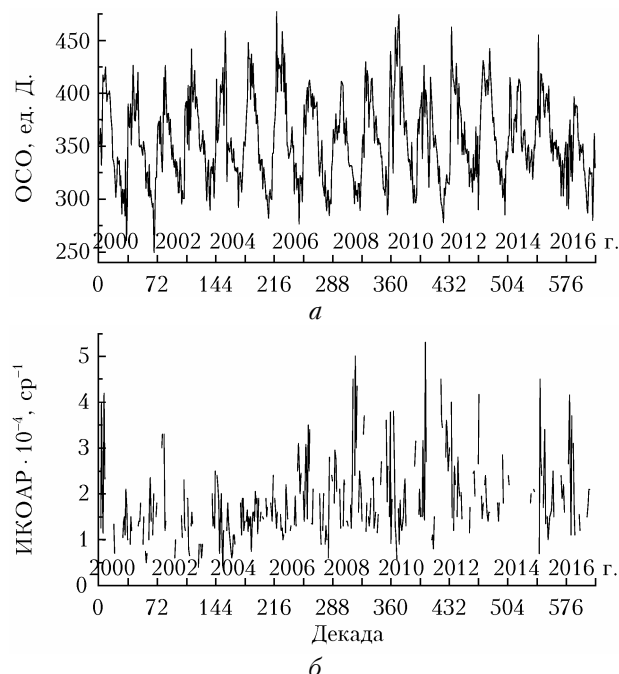


Рис. 1. Временные ряды: *a* – ОСО; *б* – ИКОАР

У временного ряда ИКОАР менее регулярная структура (см. рис. 1, *б*): видны участки, для которых данные отсутствуют. Сезонные колебания в ряде ИКОАР слабо заметны, однако они четко проявляются в Фурье-спектре [7]. Причина сезонных

колебаний ИКОАР, так же как и ОСО, – горизонтальное (адвективное) движение воздушных масс; их усиление в холодный период обуславливает формирование максимума в годовом ходе ИКОАР, а ослабление в теплый период – формирование минимальных значений [20]. Это показывает и обобщение данных лидарных наблюдений за стратосферным аэрозольным слоем после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. [23]. Таким образом, формирование слоев озона и аэрозоля в стратосфере обусловлено горизонтальным движением воздушных масс.

Мерой взаимосвязи между двумя генеральными выборками двух случайных величин является коэффициент корреляции [24]. Этот коэффициент, рассчитанный по 366 точкам, равен  $r = -0,23$ . Однако это значение не отражает реальной взаимосвязи между рядами. Иллюстрацией этого служит рис. 2, на котором представлена функциональная зависимость

$$y_{\text{ОСО}}(i) = f[x_{\text{ИКОАР}}(i)], \quad (1)$$

где  $y_{\text{ОСО}}$ ,  $x_{\text{ИКОАР}}$  – значения ОСО и ИКОАР;  $i$  – номер отсчета (декады) в рядах (параметр). Здесь видно, что какая-либо функциональная зависимость между значениями ОСО и ИКОАР отсутствует. Они меняются случайным образом при регулярном изменении значений ряда (т.е. декад) (рис. 2).

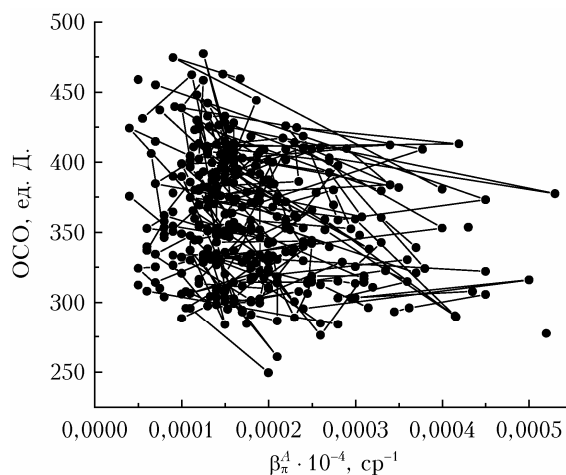


Рис. 2. Соответствия значений ОСО и ИКОАР для одних и тех же временных точек (в декадах)

Это подтвердила и проверка статистических гипотез о наличии взаимосвязи рядов на уровне вероятности 0,05, которые дают значимую цифру только в пятом знаке после запятой или вообще «0», что может быть обусловлено и случайными ошибками в значениях исследуемых рядов.

## Сравнение годовых ходов ОСО и ИКОАР

Для получения годовых ходов ИКОАР и ОСО, усредненных на временном интервале 2000–2016 гг., имеющиеся временные ходы были разбиты на годовые отрезки. Каждый отрезок представляет один год

и состоит из 36 точек (декад), т.е. было сформировано 17 независимых годовых ходов. Затем было проведено усреднение этих декад по всем годам. При отсутствии точек во временных рядах усреднение реализовывалось по реально имеющимся точкам. Усреднение привело к увеличению статистической точности каждого декадного значения усредненных годовых ходов ОСО и ИКОАР. Полученные годовые ходы и их среднеквадратичные отклонения приведены на рис. 3; коэффициент корреляции между ними оказался равным  $-0,27$ .

Извержения вулканов все же происходили в анализируемый период, поэтому для обеспечения большей регулярности ряд ИКОАР был предварительно сглажен скользящим средним по пяти точкам.

На представленных временных ходах, за начало которых выбрано начало года, отчетливо видно, что годовой ход ОСО можно аппроксимировать синусоидальной зависимостью, а ИКОАР – косинусоидальной:

$$x_{\text{ИКОАР}}(t) = A_{\text{ИКОАР}} \cos(\omega t); \quad y_{\text{ОСО}}(t) = A_{\text{ОСО}} \sin(\omega t); \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi/T$ ;  $T = 36$  декад;  $A_{\text{ОСО}} = 350$  ед. Д и  $A_{\text{ИКОАР}} = 1,8 \cdot 10^{-4}$  ср $^{-1}$  – амплитуды.

Как уже отмечалось, годовые вариации ОСО и ИКОАР обусловлены горизонтальным движением

воздушных масс в одном протяженном по высоте слое. Для ОСО протяженность этого слоя – вся атмосфера, для ИКОАР – диапазон высот 15–30 км.

Система из двух независимых переменных, изменяющихся по законам  $\sin$  и  $\cos$  от одного параметра, на плоскости образует окружность

$$\frac{x^2(t)}{a^2} + \frac{y^2(t)}{b^2} = 1, \quad \text{или} \quad y = b^2 \sqrt{1 - \frac{x^2(t)}{a^2}}. \quad (3)$$

Следовательно, и систему уравнений (2) можно рассматривать как параметрическое уравнение окружности.

На рис. 4, *a* показана зависимость ОСО от ИКОАР, согласно уравнению (3) построенная по их экспериментальным значениям, а также теоретическая окружность с соответствующими амплитудными значениями. Видно, что расположение экспериментальных точек на плоскости  $XU$  мало похоже на окружность, а значения, соответствующие зимнему периоду, вообще расположены случайным образом: нет последовательности в декадах (см. нижнюю правую часть рис. 4, *a*).

Тем не менее аналитическая окружность для более 50% экспериментальных точек попадает в диапазон их стандартного отклонения. После применения процедуры скользящего среднего по пяти точкам

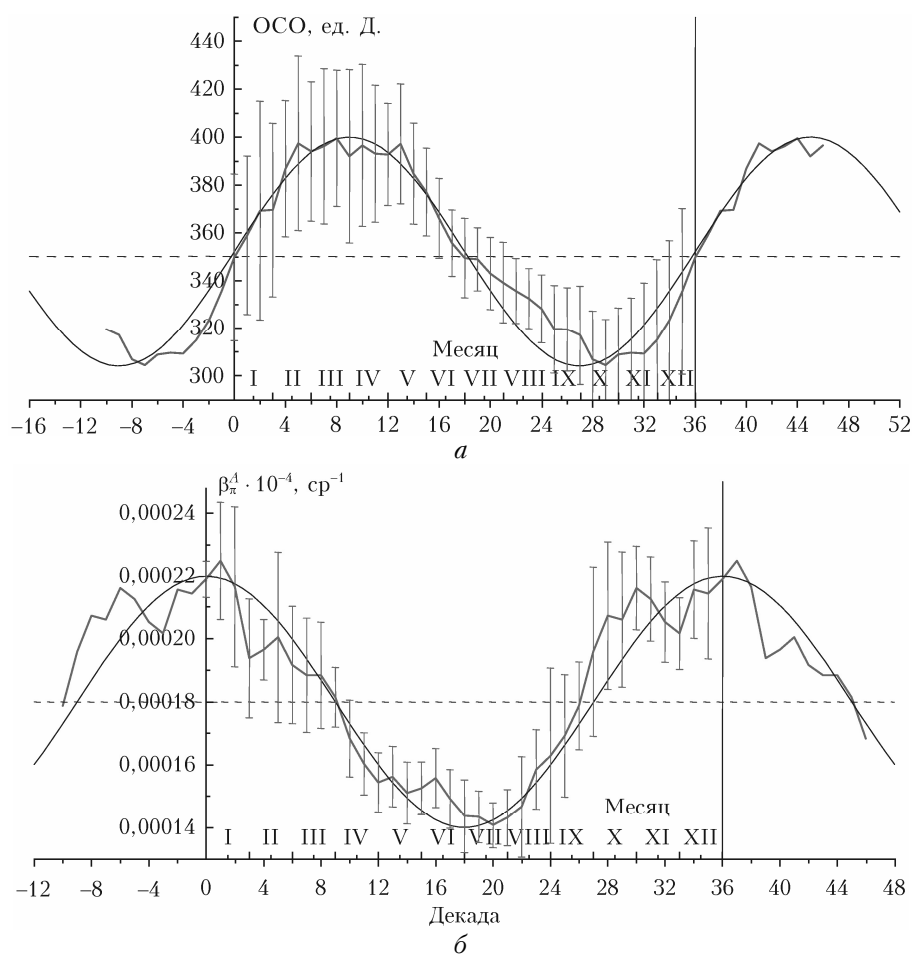


Рис. 3. Годовой ход: *a* – ОСО; *б* – ИКОАР, и их среднеквадратичные отклонения (тонкие черные линии – аппроксимирующие их кривые, соответственно,  $\sin$  и  $\cos$ )

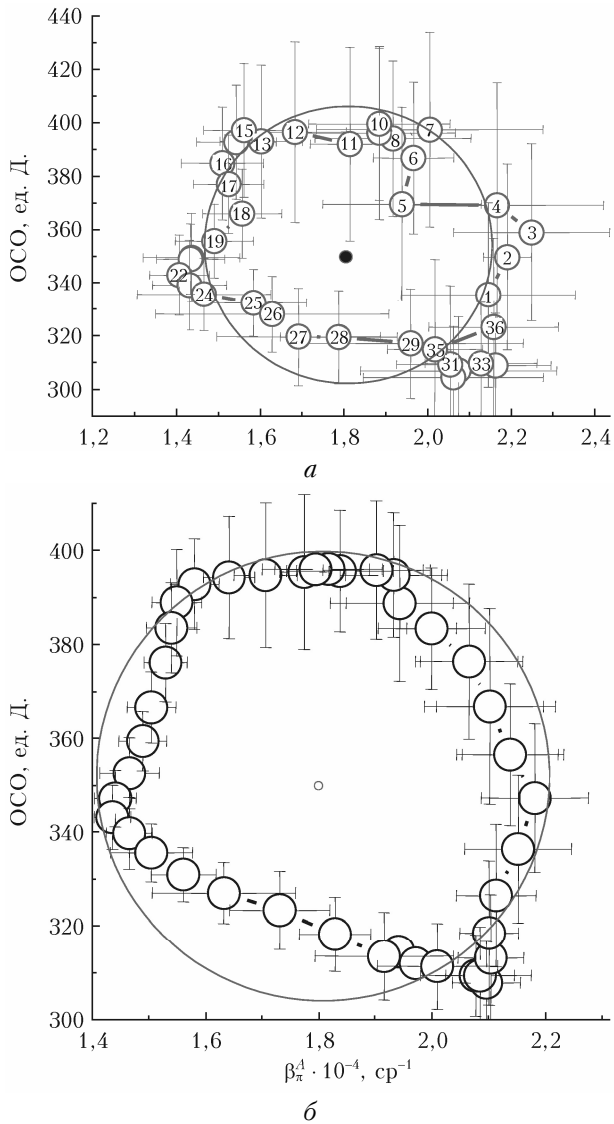


Рис. 4. Параметрическая окружность: *a* – построенная по экспериментальным значениям ОСО и ИКОАР (также присутствует аналитическая окружность с использованием их значений); *б* – после сглаживания по пяти точкам. Точки в центре рисунков – центры аналитических окружностей; значения в кружках на рис. 4, *a* – декады

в расположении экспериментальных значений появляется большая определенность, хотя полного совпадения аналитической окружности и экспериментальных значений не наблюдается (рис. 4, *б*). Этого и следовало ожидать, поскольку в атмосфере, являющейся сложной стохастической средой, на детерминированные процессы всегда накладываются случайные.

Применительно к рассматриваемой проблеме представленные результаты означают, что озон и аэрозоль, содержащиеся в стратосфере, независимы, а их годовые изменения обусловлены динамическими процессами, формируемыми в перпендикулярных направлениях. Например, для одного компонента атмосферы в направлении по оси *X*, а для другого – в направлении по оси *Y*.

## Особенности годовых вариаций ОСО и ИКОАР

Изменения ИКОАР и ОСО в стратосфере представляют собой единый процесс, начало и окончание которого определяются его минимальными значениями. Для ОСО они приходятся на октябрь-ноябрь, а для ИКОАР – на июль. Затем происходит рост до максимальных значений, которые в ряде ОСО наблюдаются примерно с третьей декады февраля по третью декаду мая. В годовом ходе ИКОАР выраженный максимум приходится на середину января. После максимальных значений ОСО и ИКОАР наблюдается спад, который длится до октября-ноября и июля соответственно. Следовательно, весь цикл изменения анализируемых параметров стратосферы длится для ОСО с октября-ноября до октября-ноября. Для ИКОАР – с июля по июль. Сформированные подобным образом временные ряды ОСО и ИКОАР представлены на рис. 5.

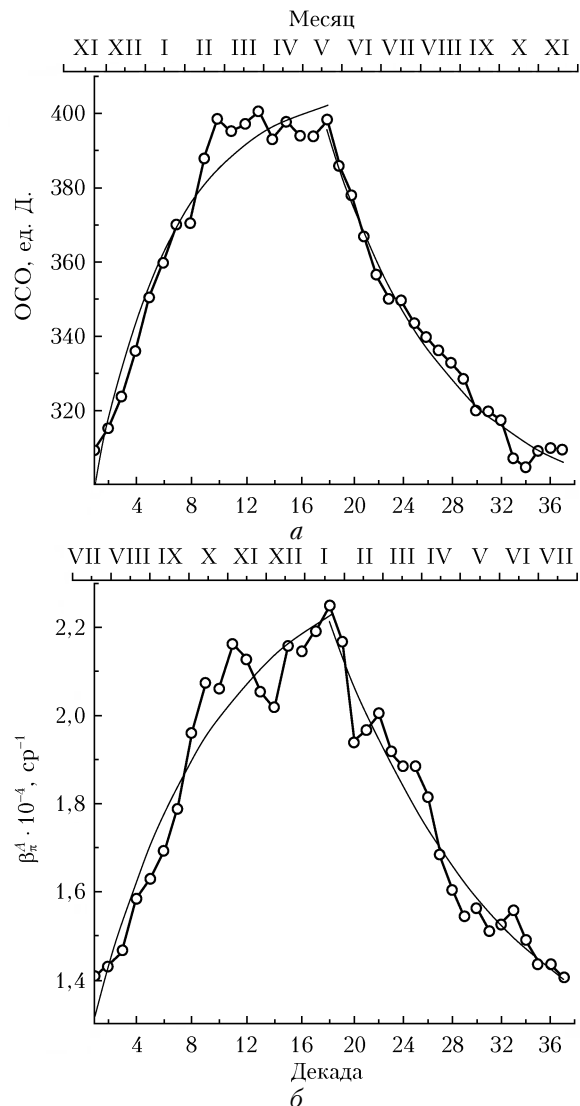


Рис. 5. Полные циклы годовых вариаций в течение года: *a* – ОСО; *б* – ИКОАР (линии с кружками – измеренные значения, тонкие линии – аппроксимирующие их кривые)

Можно заметить, что годовые циклы изменения ОСО (рис. 5, а) и ИКОАР (рис. 5, б) стратосферы в средних широтах состоят из двух участков по 18 декад. Форма каждого участка экспериментальных данных напоминает экспоненциальные кривые. Но на участке роста анализируемых параметров кривая выпуклая, а на участке спада вогнутая. Параметры аппроксимации этих участков описываются функциональной зависимостью вида

$$y(x) = A \exp(-x/\tau) + B, \quad (4)$$

где  $x$  — декады процесса;  $y$  — значения соответствующих характеристик;  $\tau$ ,  $A$  и  $B$  — константы аппроксимации, приведенные в таблице. Константа  $\tau$  при подобных экспоненциальных зависимостях называется временем релаксации, или временем жизни.

**Параметры аппроксимирующей кривой (4) для ОСО и ИКОАР**

Параметр	ОСО, ед. Д		ИКОАР · 10 <sup>-4</sup> , ср <sup>-1</sup>	
$x$	1 ÷ 18	19 ÷ 36	1 ÷ 18	19 ÷ 36
$A$	-127,3	677,7	-1,2	3,9
$\tau$	5,8	9,5	9,0	14,2
$B$	406,8	291,9	2,4	1,1
$R^2$	0,97	0,99	0,94	0,95

Коэффициенты корреляции между аппроксимирующими кривыми и экспериментальными данными ( $R^2$ ) демонстрируют, что аппроксимация обоснована и, следовательно, параметры, представленные в таблице, на самом деле указывают на экспоненциальный ход процессов увеличения и последующего спада ОСО и ИКОАР.

Представлением годового хода ОСО в виде двух изменяющихся по экспоненте составляющих объясняется и то, что при его аналитическом описании в Северном полушарии используется разложение в ряд вида [21, 25]:

$$X = X_0 + c_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + c_2 \cos(2\omega t - \varphi_2), \quad (5)$$

где  $X$  — амплитуда ОСО в годовом ходе;  $X_0$  — среднее ОСО в пятиградусной (десятиградусной) зоне;  $\omega$  — частота с периодом  $2\pi/T$  ( $T = 365$  дней);  $c_1$  и  $c_2$  — амплитуды соответствующих гармоник. В этом разложении присутствует удвоенная гармоника годовых колебаний, наличие которой констатируется как факт. Эта гармоника во временных эмпирических рядах ОСО внешне не проявляется, как и во временном ряде ОСО на рис. 1, а, но в Фурье-спектрах эта гармоника с максимумом, приходящимся на 182 суток, проявляется четко [4].

### Заключение

Представлены временные ряды ОСО и ИКОАР за период 2000–2016 гг. Анализ этих временных рядов в подекадном представлении показывает, что между ОСО и ИКОАР взаимодействие пренебре-

жимо мало. Усредненные по исследуемому периоду годовые ходы ОСО и ИКОАР хорошо аппроксимируются тригонометрическими функциями  $\sin$  и  $\cos$  соответственно, параметром которых является время в декадах. Подобные функции, изменяющиеся по перпендикулярным осям, на плоскости образуют окружность. Контуры окружности проявляются и при построении зависимости ОСО от ИКОАР. Следовательно, можно предположить, что их сезонные изменения определяются в основном движением воздушных масс в противоположных направлениях. Это является дополнительным доказательством отсутствия взаимосвязи между временными рядами.

Представление усредненных годовых ходов ОСО и ИКОАР в виде кривых с участками роста от минимальных значений к максимальным и последующего спада к этим же минимальным значениям позволило выявить, что участок роста значений как ОСО, так и ИКОАР можно аппроксимировать выпуклой экспоненциальной зависимостью, а участок спада — вогнутой. Эти два участка в годовом ходе ОСО объясняют и наличие удвоенной годовой гармоник в разложении (5).

1. Knudsen B.M., Grovss J.-U. Northern midlatitude stratospheric ozone dilution in spring modeled with simulated mixing // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 5. P. 6885–6890. DOI: 10.1029/1999JD901076.
2. Godin-Beekmanna S., Songa T., Heeseb B. Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution // Proc. SPIE. 2003. V. 4893. P. 251–263.
3. Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А. Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973–2008 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 190–195.
4. Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев С.М. Общее содержание озона над Томском в период 1994–2007 гг.: результаты статистического анализа // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 556–561; Bazhenov O.E., Elnikov A.V., Sysoev S.M. Total ozone content over Tomsk in 1994–2017: Results of statistical analysis // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 680–685.
5. Khaykin S.M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pelon J., Ravetta F., Keckhut P. Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 1639–1646.
6. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017 // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11831–11845.
7. Долгий С.И., Невзоров А.В., Ельников А.В., Сысоев С.М. Статистический анализ временного ряда общего содержания аэрозоля над Западной Сибирью // Вестн. кибернетики. 2017. Т. 27, № 3. С. 40–46.
8. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1983. 237 с.
9. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы стратосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.
10. Ельников А.В., Кавкьянов С.И., Креков Г.М., Маричев В.Н. Методика интерпретации сигналов лазерного зондирования стратосферы // Оптика атмосфер. Т. 2, № 9. С. 995–996.

11. Ельников А.В., Маричев В.Н., Шелевой К.Д., Шелефонтьев Д.И. Лазерный локатор для исследования вертикальной стратификации аэрозоля // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 4. С. 117–123.
12. Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols: The role of particle size // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. L02809. DOI: 10.1029/2007GL032179.
13. Lenton T.M., Vaughan N.E. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 5539–5561. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-9-5539-2009>.
14. Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. Возможность геонженерной стабилизации глобальной температуры в XXI в. с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий // Метеорол. и гидрол. 2013. № 6. С. 9–23.
15. Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. Технические возможности создания аэрозольного слоя в стратосфере с целью стабилизации климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2015. Т. XXVI, № 2. С. 115–127.
16. Звягинцев А.М., Зуев В.В., Крученицкий Г.М., Скоробогатый Т.В. О вкладе гетерофазных процессов в формировании озоновой аномалии в Антарктиде // Исследование Земли из Космоса. 2002. № 3. С. 1–6.
17. Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.
18. Dütsch H.U. The ozone distribution in the atmosphere // Canad. J. Chem. 1974. V. 52. P. 1491–1504.
19. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
20. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / под ред. Ю.С. Седунова, С.И. Авдюшина [и др.]. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.
21. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеониздат, 1973. 291 с.
22. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 2000. 3 изд., перераб. и доп. 777 с.
23. Зуев В.В., Ельников А.В., Бураков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы / под общ. ред. В.В. Зуева. Томск: Спектр, 2002. 352 с.
24. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Книга, 2012. 541 с.
25. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.

*A.V. Nevzorov, O.E. Bazhenov, A.V. Elnikov, V.A. Loginov. Comparison of time behaviors of integrated aerosol content in the stratosphere and total ozone content.*

We analyze the annual variations in the total ozone content (TOC) over Tomsk in period of 1994–2017 and integrated aerosol backscattering coefficient (IABC) in the period 2000–2016 obtained using M-124 ozonometer and lidar method, respectively. The correlation coefficient between these time series turned out to be  $-0.23$ , indicating that, although localized in the same altitude range, these time series are uncorrelated. Study of annual behaviors formed from these time series showed that TOC can be fitted by the function  $\sin$ , while IABC, by the function  $\cos$ . At the same time, both functions depend on a single parameter, i.e., the time in decades. This allowed us to conclude that the variations of these atmospheric constituents are formed mainly in two perpendicular directions. It is found that the annual behaviors of TOC and IABC consist of two sections, fitted by exponential curves.