

УДК 551.512.42

Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа

О.Е. Баженов¹, А.В. Ельников², С.М. Сысоев^{2*}

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

²Сургутский государственный университет
628403, г. Сургут, пр. Ленина, 1

Поступила в редакцию 27.03.2019 г.

Представлены долговременные (1994–2017 гг.) наблюдения общего содержания озона (ОСО) над Томском с помощью озонметра М-124. На их основе сформирован годовой ход с соответствующими стандартными отклонениями. После удаления из долговременного (8766 точек) ряда годовых колебаний была осуществлена проверка вариаций ОСО на нормальность распределения. Далее на основе полученных данных (также после удаления из него периодичности) была рассчитана автокорреляционная функция. В Фурье-спектре исследуемого ряда доминирующей является гармоника, соответствующая годовым вариациям ОСО. Также проявились и полугодовые колебания, амплитуда которых на порядок меньше. Однако довольно часто упоминаемые в литературе квазидвухлетние колебания в Фурье-спектре отсутствовали. Их удалось выявить более простыми методами статистического анализа.

Ключевые слова: общее содержание озона, годовой ход озона, распределения вариаций, автокорреляционная функция и Фурье-спектры, квазидвухлетние колебания ОСО; total ozone content, annual total ozone behavior, distributions of variations, autocorrelation function and Fourier spectra, quasi-biennial ozone variations.

Введение

Озон относится к оптически активным компонентам атмосферы, оказывающим существенное влияние на распространение в ней оптического излучения, а также на формирование климата [1, 2]. Наибольшее содержание озона приходится на стратосферные высоты, где образуется озоновый слой (озоносфера). Он поглощает жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца и является естественным природным щитом для всех биологических организмов и структур на Земле [3, 4].

Для выявления аномалий концентрации озона в атмосфере, причин их возникновения и принятия своевременных мер, противодействующих нарушению устоявшегося геофизического баланса, проводятся регулярные мониторинговые наблюдения за содержанием озона в атмосфере [5–7].

В Томске на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН регулярные наблюдения общего содержания озона (ОСО) с помощью М-124 были начаты в 1994 г. [8–10]. Они охватывают два 11-летних солнечных цикла (23 и 24). В статье представлен временной ход ОСО над Томском в 1994–2017 гг., результаты его

статистического анализа (годовые вариации, гистограммы распределения вариаций временного ряда, автокорреляционные функции, Фурье-спектры) и их интерпретация.

Временной ход ОСО, его тренды и сезонные вариации

Временной ход ОСО над Томском в период 1994–2017 гг., а также его аппроксимации полиномом 2-го порядка приведены на рис. 1. Коэффициенты этого полинома и линейной аппроксимации исходного ряда представлены в табл. 1. Из графических и табличных данных видно, что выраженный тренд во временном ряде ОСО отсутствует.

Колебания ОСО относительно кривой аппроксимации представляют собой его годовой ход. В более масштабном виде, после усреднения по всем годам с 1994 по 2017 г., этот ход с полученными стандартными отклонениями приведен на рис. 2, а. Здесь же представлен годовой ход после линейного сглаживания по 15 точкам, в результате чего стандартное отклонение уменьшается в $\sqrt{15}$ раз.

Годовой ход (на рис. 2, а) можно разбить на два участка. Первый, выпуклой формы, — с 300-го (с соответствующего дня календарного года, приходящегося на октябрь) по 125-й отсчет (май). На этом участке наблюдается увеличение концентрации озона. На втором участке, имеющем вогнутую форму

* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Андрей Владимирович Ельников (andreyeln@mail.ru); Сергей Михайлович Сысоев (smsysyoev57@mail.ru).

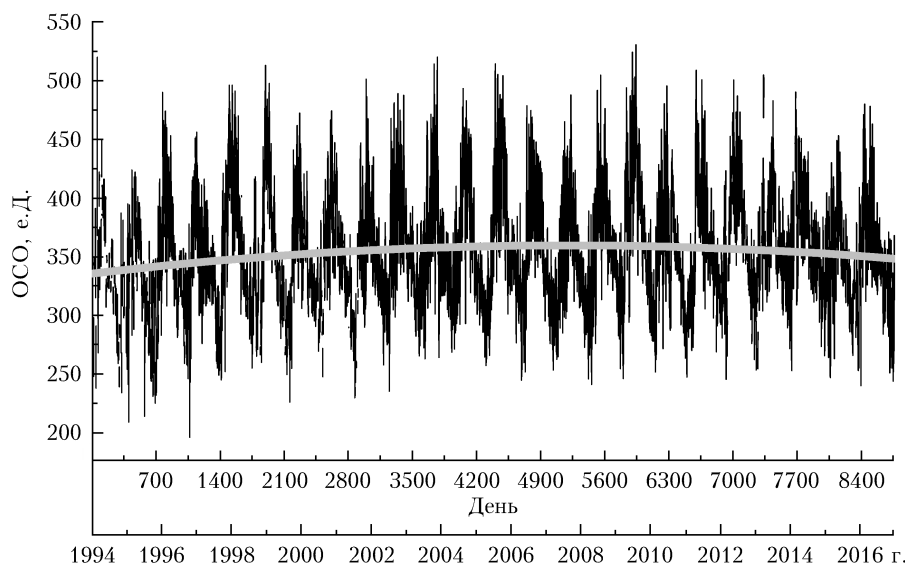
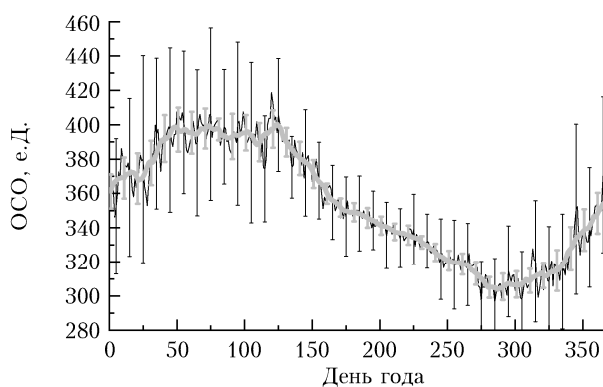


Рис. 1. Временной ход ОСО над Томском в 1994–2017 гг. и аппроксимирующий его полином 2-го порядка (серая линия)

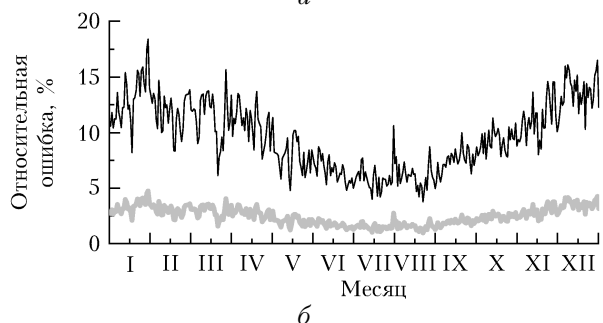
Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации ряда ОСО полиномами 1-го и 2-го порядков

Полином	A	B	C
1-го порядка $y(t) = A + Bt$	$A = 348,23$	$B = 1,26 \cdot 10^{-3}$	
2-го порядка $y(t) = A + Bt + Ct^2$	$A = 335,60$	$B = 9,23 \cdot 10^{-3}$	$C = -8,89 \cdot 10^{-7}$



а



б

Рис. 2. Средний годовой ход за 1994–2017 гг. со стандартными отклонениями (черные отрезки и кривая), этот же ряд после линейного сглаживания по 15 точкам со стандартными отклонениями (серая кривая) (а); стандартные отклонения относительно среднего значения ОСО в процентах для исходного (черная кривая) и сглаженного годовых ходов (серая кривая) (б)

(125–300-й отсчеты календарного года), ОСО уменьшается. Разная форма участков демонстрирует полугодовые колебания.

Значения стандартного отклонения σ в процентном отношении к средним значениям ОСО изображены на рис. 2, б. Видно, что σ минимально в июле–августе.

В дальнейших исследованиях временного ряда ОСО полином 2-го порядка, представленный на рис. 1, использовался для приведения ряда к нулевому значению, а сглаженный по 15 точкам и пролонгированный для всех лет наблюдений годовой ход – для удаления из исходного ряда годовых вариаций ОСО с помощью операции вычитания. Эта процедура также приводит ряд к нулевому среднему.

Функция распределения вариаций временного ряда ОСО

Измерения физической величины всегда сопровождаются флуктуациями (естественными вариациями) ее значений, заложенными в природу самого физического процесса. Дискретное представление вариаций эмпирического ряда – гистограмма, позволяющая установить вид их распределения путем ее сравнения с выбранным теоретическим распределением. Гистограмма распределения вариаций исходного ряда с нулевым средним приведена на рис. 3, а. Ее форма напоминает функцию распределения плотности вероятности нормального закона с асимметрией [11, 12]. Квадрат коэффициента корреляции R

при сравнении этой гистограммы с теоретическим распределением Гаусса с модой, приходящейся на $x = -6,3$, оказался равным 0,97868.

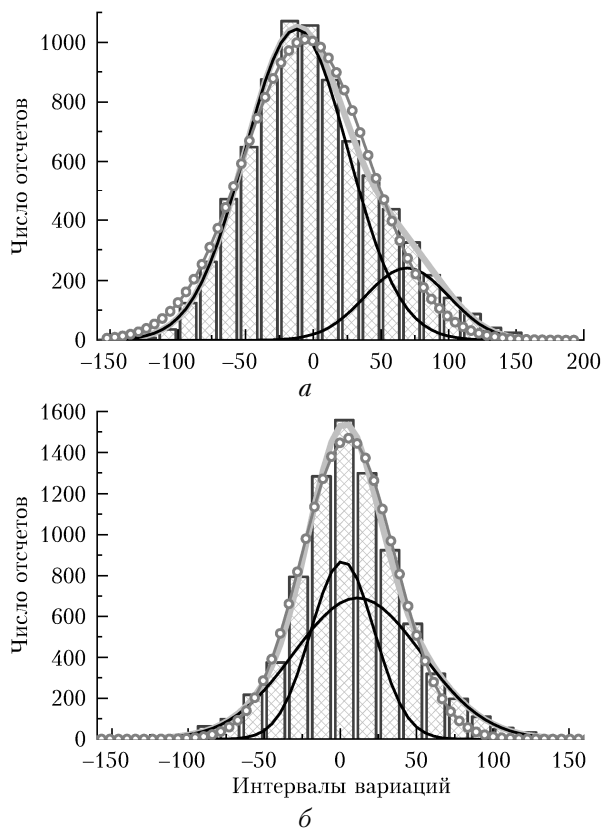


Рис. 3. Гистограмма распределения исходного эмпирического ряда ОСО (заштрихованные колонки) с нулевым средним (а) и после удаления годового колебания (б): одномодовое распределение (серая кривая с кружками); две моды нормального распределения (черные линии) и сумма этих двух распределений (серая полужирная линия)

Предполагая, что асимметрия гистограммы исходного ряда обусловлена наличием не одного, а двух физических процессов, формирующих распределение вариаций, было проведено сравнение имеющейся гистограммы с суммой двух теоретических нормальных распределений с модами при $x_1 = -12,2$ (основная) и $x_2 = 70,0$ (дополнительная) и получено значение $R^2 = 0,99712$.

Гистограмма вариаций ряда после удаления из него годовых колебаний (следовательно — ассиметрии) представлена на рис. 3, б. Таким образом, флуктуации годового хода — дополнительный процесс, формирующий вариации ОСО.

Сравнение эмпирической гистограммы с теоретическими распределениями дает следующие результаты. Квадрат коэффициента корреляции R^2 для нормального распределения с одной модой при $x = 1,01$ равен 0,99621; $R^2 = 0,9995$ для двухмодового распределения с максимумами при $x_1 = -4,4$ и $x_2 = 1,01$.

Хорошее совпадение случайной выборки, составляющей временной ряд ОСО, с теоретическим нормальным распределением свидетельствует о ее

репрезентативности, и результаты, полученные на ее основе, можно считать статистически обеспеченными и объективными.

Автокорреляционная функция временного ряда ОСО

Автокорреляционная функция (АКФ) отражает внутреннюю взаимосвязь исследуемых случайных процессов [11, 13]. Для дискретного временного ряда ее классический вид

$$\text{Corr}(\tau) = \frac{\frac{1}{n-\tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} [y(t) - \bar{y}][y(t+\tau) - \bar{y}]}{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n [y(t) - \bar{y}]^2}. \quad (1)$$

Здесь τ — сдвиг функции (в английской литературе сдвиг называется lag); $y(t)$ — значение ряда в момент времени t ; \bar{y} — среднее значение анализируемого ряда. Видно, что каждое значение $\text{Corr}(\tau)$ — обычный коэффициент линейной корреляции между временным рядом в момент времени t и тем же рядом в последующие моменты времени.

Согласно (1) при $\tau = 0$ $\text{Corr}(0) = 1$, т.е. наблюдается полная корреляция временного ряда. Однако его вариации формируются как естественными колебаниями физического объекта, имеющего внутреннюю взаимосвязь, так и некоррелированными флуктуациями случайного характера («белым шумом»). Поэтому при первом сдвиге (от $\tau = 0$ до 1) спад АКФ обусловлен реальным уменьшением не только внутренней взаимосвязи исследуемых процессов, но и «белого шума». Реальные значения АКФ физического процесса оказываются заниженными. На указанном интервале $\tau = 0 \div 1$ коэффициент корреляции «белого шума» спадает до нуля и при дальнейших сдвигах ($\tau = 1, 2$ и т.д.) не оказывает влияния на АКФ [11, 13, 14].

Исходный временной ряд ОСО содержит годовые колебания (см. рис. 1), которые определяют вид автокорреляционной функции. Они убывают по амплитуде, и на их фоне внутренняя взаимосвязь процессов полностью теряется. Поэтому анализируется только АКФ временного ряда ОСО, из которого удалены сезонные колебания. Эта функция представлена на рис. 4, а. На начальном участке ($\tau = 0 \div 60$) происходит плавный экспоненциальный спад АКФ (именно такая зависимость характерна для автокорреляционных функций), а далее наблюдаются вариации с достаточно регулярной структурой, но с разными амплитудами. Это обусловлено тем, что суточные значения от года к году не одинаковы, а из временного ряда ОСО удаляется среднесуточное значение, полученное по всем годам, что и оставляет в ряде небольшие годовые различия.

Как уже отмечалось, первое значение (при $\tau = 0$) искажено вкладом «белого шума». Он был удален с помощью следующей процедуры. Участок АКФ на интервале $\tau = 1 \div 20$ (т.е. значение АКФ

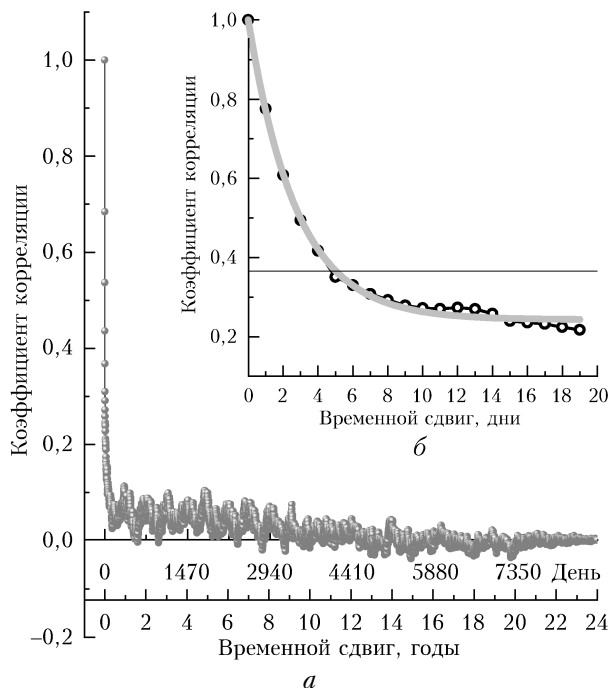


Рис. 4. АКФ временного ряда ОСО на всем интервале сдвигов (а); на начальном участке (черная кривая с кружочками), ее аппроксимация (серая кривая), АКФ при $\tau = \exp(-1)$ (горизонтальная линия) (б)

при $\tau = 0$ не задействуется) задается экспоненциальной функцией вида

$$\text{Corr}(\tau) = A \exp(-\tau/B) + C. \quad (2)$$

Параметры функции были определены с помощью метода наименьших квадратов:

$$A = 0,67 \pm 0,02; B = 2,76 \pm 0,14; C = 0,21 \pm 0,004. \quad (3)$$

С использованием этих параметров функция (2) экстраполируется на $\tau = 0$: $\text{Corr}(0) = A + C = 0,882$. Это значение принимается за нулевое значение АКФ, и вся АКФ на него нормируется. Полученный участок АКФ показан на рис. 4, б.

Приняв за критерий наличия внутренней взаимосвязи $\text{Corr}(0) > e^{-1}$ (т.е. 0,367), видим, что во временном ряде ОСО она наблюдается на протяжении ~5 сут, поскольку именно на этом интервале сдвигов $\text{Corr}(\tau)$ спадает от 1 до 0,367.

Фурье-спектры временного ряда ОСО

Для выявления всех гармонических колебаний (гармоник) исходного (т.е. годовые вариации не удалены) временного ряда ОСО к нему была применена процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ). Энергетический Фурье-спектр в относительных единицах (т.е. вклад гармоники в общую энергию спектра) после линейного сглаживания по трем точкам представлен на рис. 5, а. Но прежде чем применять БПФ, мы привели ряд к нулевому среднему, а затем придали ему форму окна Хемминга:

$$w(n) = 0,53836 - 0,46164 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right). \quad (4)$$

Эта процедура сглаживает данные на границах ряда для того, чтобы минимизировать эффекты, возникающие в нем при Фурье-преобразовании в точках скачкообразных изменений (т.е. на границе «есть данные – нет данных»). Могут использоваться и другие окна [14]. Вид ряда, на основе которого были получены Фурье-спектры, показан на вставке на рис. 5, а.

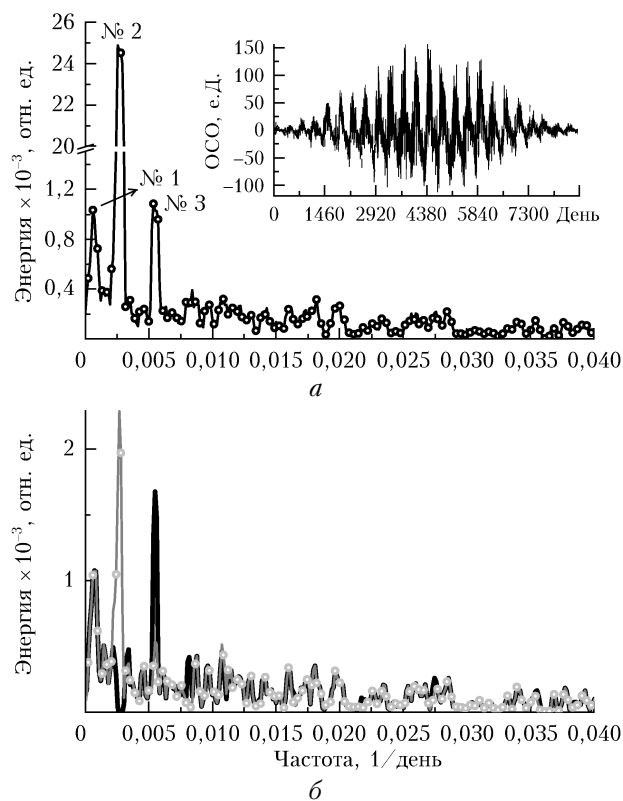


Рис. 5. Фурье-спектр временного ряда ОСО, сглаженный по 3 точкам (кривая с кружочками), и исходный ряд, на основе которого был получен этот Фурье-спектр (вставка) (а); Фурье-спектр временного ряда ОСО после удаления из него годовых колебаний (серая кривая с кружочками) и после применения блокирующего фильтра (черная кривая) (б)

В спектре энергий на рис. 5, а (с разрывом по оси ординат) выделяются три гармоники. Наибольшая энергия приходится на гармонику № 2, амплитудные значения двух других меньше примерно в 25 раз. Видно, что максимальные значения наблюдаемых гармоник не совпадают с их центрами, поэтому центральные частоты определялись на основе их полуширины:

$$\nu_0 = \nu_{\text{л.кр}} + (\Delta\nu/2), \quad (5)$$

где ν_0 — центр пика; $\nu_{\text{л.кр}}$ — левый край гармоники на уровне 0,5 от максимума; $\Delta\nu = \nu_{\text{п.кр}} - \nu_{\text{л.кр}}$ — полуширина гармоники, $\nu_{\text{п.кр}}$ — правый край гармоники на уровне 0,5 от максимума. Частотно-временные значения центров гармоник и их полуширины приведены в табл. 2.

Частотно-временные значения гармоник

Параметр	Гармоника					
	№ 1		№ 2		№ 3	
	Левый край	Правый край	Левый край	Правый край	Левый край	Правый край
Частота на полувысоте максимума	$2,4589 \cdot 10^{-4}$	$11,0160 \cdot 10^{-4}$	0,002396	0,003016	0,005176	0,005850
Полуширина	$8,557 \cdot 10^{-4}$		0,000620		0,000674	
Центр	$6,7375 \cdot 10^{-4}$		0,002706		0,005513	
<i>Значение в днях (1/v)</i>						
Частота	4067	908	417,4	331,6		
Центр	1484		369,5		181,4	
<i>Значение в годах 1/(365 дней)</i>						
Частота	4,066		1,012		0,497	

Видно, что гармоники № 2 и № 3 – это проявление в спектре годовых и полугодовых колебаний, а гармоника № 1 – 4-летних. Гармоника № 1 осталась неизменной и в Фурье-спектре временного ряда, из которого удален годовой ход, а вот амплитуда других гармоник уменьшилась, причем энергия колебаний гармоники № 3 (полугодовой) сравнялась с уровнем шума. Полугодовые колебания – это составная часть годовых вариаций, при вычитании последних удаляются вместе с ними. Частичное проявление в Фурье-спектре на рис. 5, б гармоники на частоте $\sim 0,00025$ отражает тот факт, что годовые колебания имеют полуширину в частотном диапазоне $\Delta\nu = 2,34 \div 3,00 \cdot 10^{-3}$ (см. рис. 5, а и табл. 2) и при удалении из ряда одной гармонической составляющей другие остаются неизменными. Более эффективная процедура удаления из ряда гармонических составляющих определенного диапазона частот – применение блокирующего фильтра, соответствующего этому диапазону. Результат этой процедуры для годовой гармоники показан на рис. 5, б черной кривой [15].

Видно, что годовые колебания исчезли полностью, а полугодовые проявились ярче. Во всех других частотных диапазонах, в том числе и отражающих вклад шума, спектры подобны, за исключением участка в районе частоты 0,00821, что соответствует 121,8 дням.

Квазидвухлетние колебания ОСО и 11-летние колебания солнечной активности

Вариации ОСО подвержены квазидвухлетним колебаниям, обусловленным глобальной перестройкой стратосферных ветров [16]. Эти колебания, в отличие от годового хода, имеют менее регулярную структуру (отсюда и название «квазидвухлетние») и в Фурье-спектре в явном виде не проявляются (см. рис. 5). Чтобы в явном виде наблюдать квазидвухлетние колебания во временном ходе ОСО над Томском в период 1994–2017 гг., были применены следующие процедуры. Первая – сглаживание исходного ряда скользящим средним с окном 365 точек, что, хотя и не в полной мере, нивелирует вклад годовых и более высокочастотных колебаний. Вторая (более радикальная) процедура – представление временного ряда средними годовыми значениями. Этот ряд содержит всего 24 точки и имеет резко выраженную изломанную структуру. Для придания ему плавного хода была использована сплайн-аппроксимация. Обе процедуры уменьшают случайную ошибку ряда или стандартное отклонение в $\sqrt{365}$ раз. Полученные временные ряды изображены на рис. 6. Они имеют схожую структуру и на протяжении всего срока наблюдений содержат колебания,

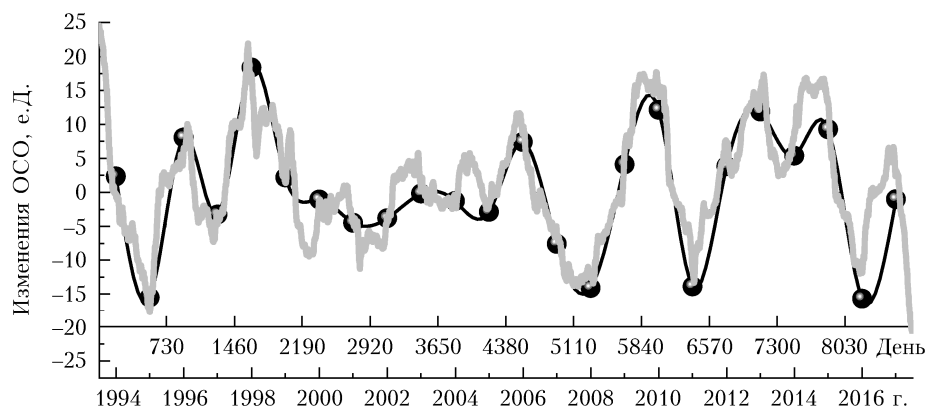


Рис. 6. Временной ряд ОСО с выделенными в нем долгопериодными колебаниями, сглаженный скользящим средним (серая кривая) и аппроксимированный сплайн-функцией (черная кривая)

изменяющиеся по амплитуде с периодами примерно 2 года. Эти колебания «размазаны» по довольно широкому частотному диапазону и поэтому в Фурье-спектрах не проявились.

Как уже отмечалось, протяженность анализируемого ряда — 24 года, которые приходятся на 11-летние циклы солнечной активности 23 и 24 с максимумами на временных интервалах 2000–2002 гг. (23) и 2011–2015 гг. (24) и минимумами в 1996 и 2009 г. соответственно [17]. Известно, что озон в атмосфере образуется в результате фотохимических реакций [18], следовательно, можно ожидать проявление этих двух циклов в анализируемом временном ходе ОСО. Однако в [19] отмечается, что вариации, обусловленные активностью Солнца, не превышают 10%, а в основном их влияние и того меньше. Последнее, вероятно, и определяет полное отсутствие колебаний этого периода на временном ходе ОСО, показанном на рис. 6.

Заключение

Представлены долговременные (1994–2017 гг.) наблюдения общего содержания озона над Томском с помощью озонметра М-124. На их основе сформирован годовой ход с соответствующими стандартными отклонениями. Максимальные значения ОСО приходятся на февраль — апрель, так же как и σ , а вот минимум σ наблюдается в августе. После удаления из долговременного (8766 точек) ряда годовых колебаний было установлено хорошее совпадение эмпирического распределения вариаций с нормальным (гауссовским) законом распределения. Далее на основе полученных данных (также после удаления из него периодичности) была рассчитана АКФ. Ее анализ показал, что ОСО обладает внутренней взаимосвязью длительностью 5 дней, которая определялась по спаду значения коэффициента корреляции в e раз, т.е. $\exp(-1)$. В Фурье-спектре исследуемого ряда, как и ожидалось, доминирующей является гармоника, отвечающая за годовые вариации ОСО. Кроме того, в спектре присутствуют и полугодовые колебания, амплитуда которых более чем на порядок меньше годовой гармоники, а вот часто упоминаемые в литературе квазидвухлетние колебания в спектре отсутствуют. Выявить их удалось при помощи процедуры сглаживания ряда скользящим средним с использованием 365 точек и усреднением по годам (каждый год представляется одним значением, а ряд в целом — 24 точками). Обе процедуры удаляют из анализируемого ряда как доминирующие годовые, так и более высокочастотные колебания и позволяют увидеть контрастные колебания более низких частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-47-860014).

O.E. Bazhenov, A.V. Elnikov, S.M. Sysoev. Total ozone content over Tomsk in 1994–2017: results of statistical analysis.

We presented the long-term (1994–2017) M-124 ozonometer observations of the total ozone (TO) content over Tomsk. They were used to determine the annual behavior with the corresponding standard deviations. After the long-term (8766 points) time series was processed to remove the annual oscillations, its variations were examined for a normality of the distribution. Next, the data obtained (also after being processed to remove the periodicity) was used to calculate the autocorrelation function. A harmonic, corresponding to the annual TO variations, predominates in the Fourier spectrum. Half-year oscillations with an order of magnitude lower amplitude were also detected. However, the Fourier spectrum contained no quasibiennial oscillations, quite often mentioned in the literature. They were extracted using simpler methods of statistical analysis.

1. Александров Э.Л., Кароль И.Л., Ракипова Л.Р., Седунов Ю.С., Хргиан А.Х. Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 167 с.
2. *Оценочный доклад об изменениях климата и его последствиях на территории Российской Федерации*. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
3. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 288 с.
4. Кривоуцкий А.А., Ретнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 384 с.
5. Стехелин И. Глобальный мониторинг атмосферного озона // Бюл. ВМО. 2008. Т. 57, № 1. С. 45–54.
6. Кашкин В.Б., Кашкина Л.В., Рублева Т.В. Атмосферный озон и его изучение с помощью наземной и спутниковой аппаратуры // Современное образование. 2001. № 3. С. 63–71.
7. WMO, Scientific assessment of ozone depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva: WMO, 2003. N 47. 498 p.
8. Зуев В.В., Зуев В.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Ельников А.В., Невзоров А.В. Климатология стратосферного аэрозоля и озона по данным многолетних наблюдений на Сибирской лидарной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 8. С. 719–724.
9. Зуев В.В., Долгий С.И., Баженов О.Е. Климатология и тренды стратосферного озона над Томском за период 1996–2002 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 312–316.
10. Баженов О.Е. Долговременные тренды изменений общего содержания озона по данным наземных (Томск: 56,48° с.ш., 85,05° в.д.) и спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 770–774; *Bazhenov O.E. Long-term trends of variations in total ozone content according to data of ground-based (Tomsk: 56.48°N, 85.05°E) and satellite measurements // Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 2. P. 142–146.
11. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
12. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ, 2004. 574 с.
13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных процессов. М.: Книга, 2012. 541 с.
14. Подкорытова О.А., Соколов М.В. Анализ временных рядов: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2018. 267 с.
15. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011, 768 с.
16. *Bazhenov O.E. Quasi-biennial oscillation of the total ozone and ozone concentrations at separate altitude levels over Arctic and Tomsk according to TOMS, OMI, and MLS observations // Int. J. Remote Sens.* 2015. V. 36. P. 3033–3040.
17. URL: <http://beloe-bratstvo.ru/solnechnaya-aktivnost-online/> (last access: 27.02.2019).
18. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы стратосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
19. 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.