

УДК 551.512.42

Особенности распределения поля общего содержания озона на территории России, его внутренние взаимосвязи и рассогласование данных

О.Е. Баженов^{✉1}, А.В. Ельников², В.А. Логинов^{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 06.02.2024;

после доработки 10.04.2024;

принята к печати 04.06.2024

Исследования поля общего содержания озона (ОСО) — одна из важных проблем атмосферной оптики. В работе на основе данных прибора Ozone Monitoring Instrument (OMI), установленного на борту космической платформы Ауга, анализируется пространственное распределение ОСО над территорией России. Результаты наблюдений для отдельных областей (пунктов) представлены в виде временных рядов ОСО, которые охватывают период наблюдений с января 2005 г. по декабрь 2022 г. Выявлены интегральные (без учета сезонных вариаций) широтно-долготные особенности распределения ОСО на исследуемой территории; вычислены коэффициенты корреляции между рядами для разных пунктов; исследована их взаимосвязь в зависимости от расстояния между пунктами; сформирована пространственная автокорреляционная функция и оценены размеры пространственных неоднородностей поля ОСО. Проанализировано пространственное рассогласование данных с помощью параметра, представляющего собой меру стандартного отклонения от среднего рассогласования. Результаты работы дают представление о масштабах пространственной взаимосвязи поля ОСО и могут быть использованы для уточнения оптически активной компоненты атмосферы (ОСО) при разработке прогностических моделей погоды и изменения климата.

Ключевые слова: общее содержание озона, коэффициент корреляции, пространственная автокорреляционная функция, поле общего содержания озона, рассогласование данных, стандартное отклонение от среднего рассогласования; total ozone column, correlation coefficient, spatial autocorrelation function, total ozone column field, data mismatch, standard deviation from average mismatch.

Введение

Формировавшийся одновременно с воздушной оболочкой Земли озоновый слой сыграл немаловажную роль в образовании биосферы [1, 2]. В современных условиях озоновый слой — озоносфера — выступает в качестве защиты существующих экосистем от губительного для биоты жесткого ультрафиолетового излучения Солнца, которое поглощается озоном и не достигает земной поверхности [3]. При этом изменение потока УФ-радиации, следующее за изменением концентрации озона, приводит к нарушению привычных условий функционирования экосистем в целом [4, 5]. Научный интерес представляет и сам озоновый слой как природный объект, участвующий в формировании погоды, а также неоднородности его пространственного

распределения, являющиеся естественным трассером атмосферных процессов [6, 7].

Понимание мировым научным сообществом необходимости решения проблем, связанных с озоном, привело к организации широкомасштабной международной сети наземных мониторинговых станций общего содержания озона (ОСО) под эгидой Всемирной метеорологической организации [8]. В последние 40–50 лет в связи с интенсивным развитием космических технологий существенный вклад в регулярный мониторинг ОСО вносят измерения с использованием приборов космического базирования [9]. С 2004 г. глобальное картирование поля ОСО осуществляется прибором Ozone Monitoring Instrument (OMI) (Голландия—Финляндия), установленным на спутнике Aura [10, 11]. Измерения осуществляются оптическим методом, в основу которого заложено сравнение интенсивности рассеянного солнечного излучения, уходящего от земной поверхности (метод дифференциального поглощения), в разных спектральных диапазонах. Результаты мониторинговых наблюдений, охватывающих

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

в том числе и территорию России, представлены в виде временных рядов ОСО в свободном доступе [12]. В настоящей работе исследуются временные ряды ОСО для различных областей на территории России, полученные в период с 1 января 2005 г. по 31 декабря 2022 г. (всего 6574 значений).

Цель работы — на основе рядов среднесуточных значений ОСО для разных пунктов определить коэффициент корреляции и рассогласование этих временных рядов между рассматриваемыми пунктами. Это позволит оценить размеры пространственных неоднородностей поля ОСО.

Распределение ОСО на территории России

На рис. 1 представлены населенные пункты, над которыми анализировалось ОСО, и значения ОСО, отображаемые размерами сфер. Семь пунктов из 27 расположены в полярных широтах, они отделены от других пунктирной линией и окрашены серым цветом. В их временных рядах присутствуют интервалы без мониторинговых данных ОСО, которые приходятся на период года около зимнего солнцестояния, когда в северных широтах наступают полярная ночь и сумерки. В это время Солнце находится ниже линии горизонта на $0 \div 6^\circ$ в зависимости от широты, и оптические измерения невозможны. Данные этого периода не используются при вычислениях и не дают никакого вклада в определение среднегодовых значений ОСО.

На рис. 1 не заметно проявление принципа Дютша–Добсона [13–15], согласно которому должно наблюдаться повышение ОСО с юга на север. Среднегодовое значение ОСО в пункте «Кисловодск» наименьшее, в интервале $310 \div 318,75$ е.Д., а в более южном пункте «Владивосток» оно приходится на интервал $345,0 \div 353,75$ е.Д. Географическое положение пунктов с максимальными значе-

ниями ОСО: «Николаевск-на-Амуре» (379,9 е.Д.), «Нагаево» (377,38 е.Д.), «Марково» (372,11 е.Д.), также не отвечает принципу Дютша–Добсона.

Рис. 1 показывает неуклонное увеличение ОСО с запада на восток, достигающего максимума в районе Охотского моря. Более детально изменение ОСО на территории России в зависимости от долготы представлено на рис. 2. Здесь серые сферы соответствуют пунктам полярных широт, которые до 110° в.д. вписываются в тенденцию увеличения ОСО с запада на восток, а далее, вместе с наиболее южным пунктом («Владивосток»), формируют группу с минимальными значениями ОСО в противовес максимальным, находящимся в этом же долготном интервале в районе Охотского моря.

Регрессионная кривая построена по экспериментальным точкам с использованием метода наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующей функции был выбран полином третьей степени $y(x) = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$, дающий наилучшее согласие между кривой и эмпирическими данными, т.е. наименьшую сумму квадратов остатков. Здесь $y(x) = \langle \text{ОСО} \rangle$; $x = [\text{град}]^\circ$ в.д.; коэффициенты полинома: $A = 339,5958 \pm 17,789$; $B = -0,65 \pm 0,67$; $C = 0,01073x^2 \pm 0,00731$; $D = -(3,1311 \pm 2,4384) \cdot 10^{-5}$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,86187$. Другие критерии подобия статистического анализа также указывают на то, что гипотеза увеличения $\langle \text{ОСО} \rangle$ с запада на восток статистически значима.

Максимальные значения ОСО на $140 \div 150^\circ$ в.д. неоднократно приводились в работах [16–19] для конкретных дат (т.е. единичные выборки), в то время как средние значения общего содержания озона (см. рис. 2) представляют обобщенные данные наблюдений за 18-летний период. Следовательно, полученное устойчивое увеличение ОСО с запада на восток над территорией России можно отнести к особенностям поля ОСО данного региона.

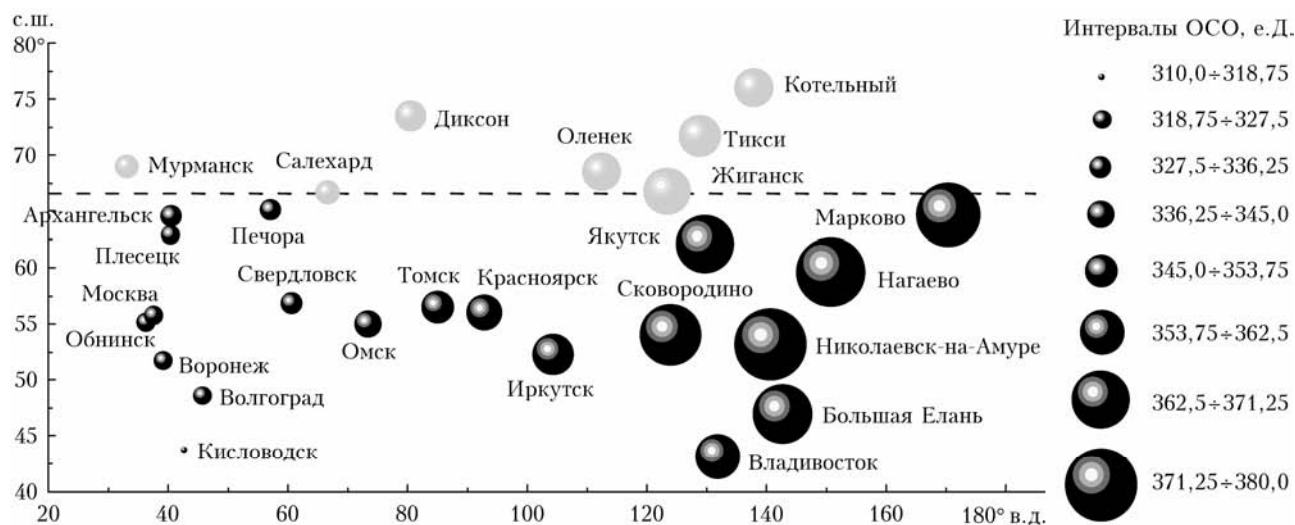


Рис. 1. Широтно-долготное распределение и среднегодовые значения ОСО на территории России

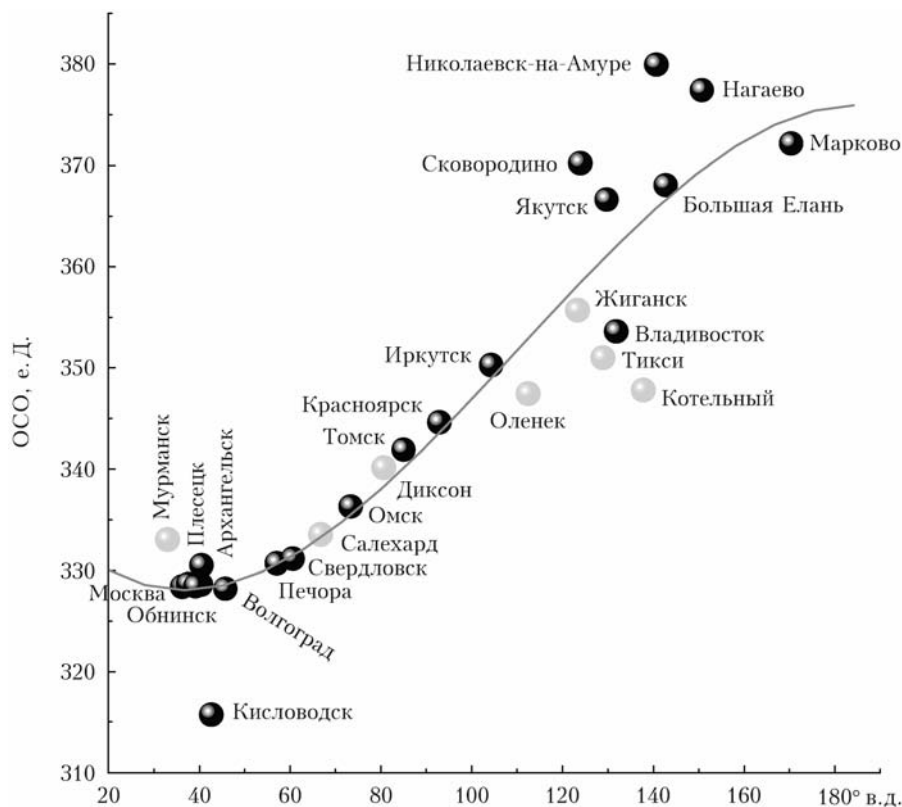


Рис. 2. Общее содержание озона над территорией России в зависимости от долготы

Коэффициенты корреляции между временными рядами ОСО в разных пунктах и их пространственная автокорреляционная функция

Для количественной оценки подобия однородных массивов различных эмпирических данных (речь идет о временных рядах ОСО для разных пунктов) в статистике широко используется коэффициент корреляции R (коэффициент Пирсона), определяющий величину линейной зависимости между массивами [20, 21]. Наиболее объективно значения R отражают взаимосвязь анализируемых рядов при отсутствии в них детерминированных составляющих, в том числе периодических.

Временные ряды ОСО имеют выраженную модуляцию сезонными изменениями. Для ее нивелирования ряды предварительно сглаживались скользящим средним по 182 точкам, затем сглаженный ряд вычитался из исходного. Применение этого алгоритма приводит к нивелированию разницы в общем содержании озона, обусловленной местоположением пунктов, которая с запада на восток может достигать 50 е.д., что сопоставимо с амплитудой сезонных колебаний [22]. Полученные остатки представляют временной ряд ОСО (приведенный ряд), который используется для вычисления коэффициентов корреляции между разными пунктами. Количество пунктов $n = 27$. Это число определяет количество возможных попарных комбинаций временных рядов и, следовательно, коэффициентов корреляции

между ними по формуле $Z = 1/2n(n - 1)$, т.е. $Z = 351$. Сами коэффициенты корреляции вычислялись согласно выражению (1) [21]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x[i])(y[i])}{\sum_{i=1}^N (x[i])^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y[i])^2}, \quad (1)$$

где $N = 6574$ — число параллельных измерений, при полном заполнении рядов; $x[i]$, $y[i]$ — приведенные значения ОСО соответствующих пунктов. При отсутствии одной из сравниваемых величин суммирование не производится и число параллельных измерений уменьшается.

На рис. 3 приведен в виде точек массив вычисленных коэффициентов корреляции на плоскости. По оси абсцисс отложено расстояние между пунктами i и j (т.е. ΔR_{ij}). Серыми точками на рис. 3 представлены коэффициенты корреляции между пунктами: полярный — полярный и неполярный — полярный, а черными — неполярный — неполярный. Существенных отличий в распределении черных и серых точек не наблюдается. Следовательно, процессы, формирующие поле ОСО в средних широтах и за полярным кругом, подобны, поэтому коэффициенты корреляции, представленные на плоскости, отражают единую выборку значений сформировавшегося поля ОСО.

Коэффициент корреляции рядов ОСО при $\Delta R_{ij} = 0$ км (т.е. при сравнении ряда с самим собой), естественно, равен единице, и эта точка тоже нанесена

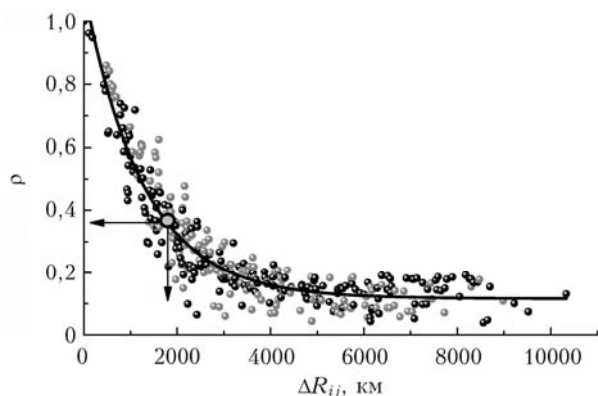


Рис. 3. Массив коэффициентов корреляции ОСО между разными пунктами и регрессионная кривая

на плоскость и соответствует максимальному значению корреляции ($\rho = 1$). Следующее по величине значение $\rho = 0,96$ — это коэффициент корреляции между пунктами «Москва» — «Обнинск» ($\Delta R_{ij} = 107$ км). При $\Delta R_{ij} = 187$ км («Архангельск» — «Плесецк») $\rho = 0,95$. Далее с увеличением расстояния между пунктами наблюдается уменьшение ρ ; на расстоянии 5000 км ρ выходит на постоянный уровень.

Массив точек на рис. 3 является пространственной автокорреляционной функцией (АКФ). В классическом варианте любая АКФ представляет собой свертку исходного ряда с этим же рядом, последовательно сдвигаемым на один отсчет. В результате вычислений имеем функцию АКФ(τ) (где τ — величина сдвига, или Lag), каждое значение которой — это коэффициент корреляции между рядами при соответствующем сдвиге. С ростом аргумента τ функция монотонно спадает по экспоненте [20]. Экспоненциальная зависимость ρ от расстояния просматривается и на рис. 3. Это можно считать дополнительным подтверждением, что представленный на рис. 3 массив точек — пространственная АКФ поля ОСО. Используемый термин «поле» означает, что коэффициенты корреляции здесь отражают взаимосвязь между данными в пунктах, которые расположены в разных азимутальных направлениях и на разных расстояниях друг от друга. Это приводит к дополнительному рассеиванию точек ρ на плоскости (см. рис. 3) помимо того, которое обусловлено измерениями как таковыми. Расстояние между пунктами может быть практически равным, но для разных направлений взаимосвязь может формироваться разными процессами и приводить к существенно различным ρ и увеличению диапазона рассеивания точек по оси ординат.

Регрессионная кривая массива точек на рис. 3, полученная с использованием метода наименьших квадратов, — это экспоненциальная зависимость вида

$$\rho(\Delta R) = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta R}{B}\right) + C, \quad (2)$$

где $\rho(\Delta R) \equiv \text{АКФ}(\tau)$; A, B, C — коэффициенты регрессии. Параметры и оценки статистического

подобия кривой регрессии массиву ρ , представленному на рис. 3, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты экспоненциальной зависимости (2) и корреляции ρ (рис. 3)

Коэффициент	Значение
A	$0,99 \pm 0,02$
B	1278 ± 46
C	$0,118 \pm 0,01$
R^2	0,89
χ^2	0,0039

По результатам статистического анализа с вероятностью 95% можно утверждать, что массив является выборкой процесса, описываемого представленной кривой, а полученная экспоненциальная зависимость — пространственная автокорреляционная функция поля ОСО. Отклонение вычисленных коэффициентов от аппроксимирующей кривой определяется как

$$\delta(\Delta R) = \rho(\Delta R) - \rho_k(\Delta R_{ij}); \quad k = 1, \dots, 351, \quad (3)$$

где $\rho(\Delta R)$ — значение коэффициента корреляции согласно регрессионной кривой; ρ_k — вычисленный коэффициент корреляции на основе данных ОСО для 351 точки; $\Delta R \equiv \Delta R_{ij}$ — расстояние между пунктами, не выходящее за интервал $\pm 0,1$ относительно кривой регрессии. Более детально вариации отклонения с расстоянием обсуждаются ниже.

На рис. 3 кружком со стрелками, направленными к осям, отмечен коэффициент корреляции $\rho = 0,367$ (горизонтальная стрелка пересекает ось ординат именно в этой точке). Он соответствует значению $\rho = \exp(-1)$, т.е. точке, в которой коэффициент корреляции уменьшается в e раз. Обычно спад любой характеристики процесса в e раз принимается за его границу. Значение $\rho = 0,367$ определяет масштаб пространственных неоднородностей ОСО как статистической характеристики поля ОСО. Судя по рисунку, их размер оказался равен ~ 1800 км.

Рассогласование временных рядов ОСО между разными пунктами и его функция

Для сравнения результатов измерений ОСО, например, в одной точке, но разными приборами, довольно часто используется понятие «рассогласование данных», отражающее величину их расхождения [22, 23]. Применим этот параметр и для исследования поля ОСО в следующей формулировке: рассогласование данных, полученных одним прибором, но в разных пунктах. Рассогласование выражается через следующие ненормированные характеристики:

среднее рассогласование

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i);$$

среднеквадратичное рассогласование

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2};$$

стандартное отклонение от среднего рассогласования

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i - M)^2} \quad (4)$$

(x_i, y_i — сравниваемые величины, выражаются в единицах измерения озона, т.е. е.Д., могут принимать значения ноль, если сопоставляется один и тот же ряд, либо любое другое положительное или отрицательное значение).

Проанализируем рассогласование данных между разными пунктами на основе стандартного отклонения от среднего рассогласования σ . Поскольку сезонные колебания ОСО в нем нивелируются разницей двух точек ($x_i - y_i$), а разница ОСО, обусловленная положением пунктов, — средним рассогласованием M , то очистку рядов от них проводить не требуется.

Количество значений σ , вычисленных попарно для разнесенных по пространству пунктов, также равно 351, и все они в виде массива представлены на плоскости рассогласований в зависимости от расстояний между пунктами на рис. 4. При $\Delta R_{ij} = 0$ км $\sigma = 0$. Для пунктов, разнесенных на 107 км («Москва» — «Обнинск»), $\sigma = 9,31$. Следующее значение $\sigma = 12,54$ приходится на $\Delta R_{ij} = 187$ км («Архангельск» — «Плесецк»). Затем $\sigma = 20,90$ и $22,09$ для пунктов «Воронеж» — «Обнинск» (433 км) и «Воронеж» — «Москва» (464 км) соответственно, и далее с увеличением расстояния наблюдается рост σ по экспоненциальному закону.

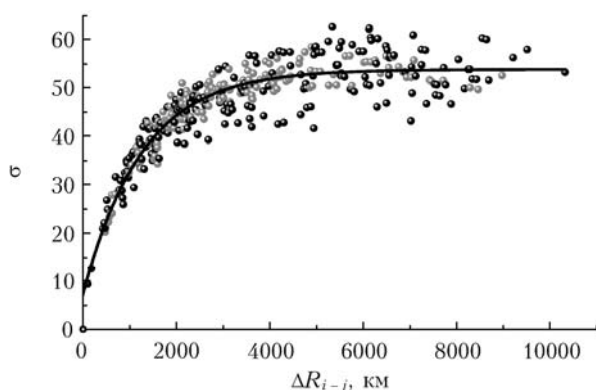


Рис. 4. Массив рассогласования данных наблюдений ОСО в виде стандартного отклонения от среднего рассогласования и его аппроксимирующая кривая; серые точки — значения σ , в вычислении которых использовались пункты за полярным кругом

Сплошной линией на рис. 4. изображена регрессионная кривая представленного массива точек. Она также получена с использованием метода наименьших квадратов согласно выражению (2).

В табл. 2 приведены ее коэффициенты для выражения (2) и статистические параметры сравнения.

Таблица 2

Коэффициенты экспоненциальной зависимости (2) массива рассогласований σ

Коэффициент	Значение
A	$-46,7 \pm 1,4$
B	1262 ± 56
C	$53,7 \pm 0,3$
R^2	0,85
χ^2	12,28

Видно, что и сам массив σ (см. рис. 4), и его регрессионная кривая являются «зеркальным» отражением относительно оси абсцисс массива ρ (см. рис. 3) и, следовательно, являются функцией рассогласования данных поля ОСО.

Сравнение автокорреляционной функции и функции рассогласования данных

Как было отмечено выше, пространственная автокорреляционная функция поля ОСО и функция его рассогласования «зеркальны», но диапазон изменения у них разный. Конечные значения этих диапазонов определяют коэффициенты C регрессионных кривых и равны они $\rho(\infty) = 0,118$ и $\sigma(\infty) = 53,7$, а начальные значения, согласно экспоненциальной зависимости (2), равны $\rho(0) = 0,99$ и $\sigma(0) = 7,0$, хотя по определению $\rho(0) = 1$ и $\sigma(0) = 0$. Имеющиеся различия обусловлены наличием погрешности в данных, по которым рассчитывались коэффициенты регрессии. Но это константы, а при любом анализе данных, в том числе и регрессионном, определяющую роль играет параметр, формирующий скорость изменения функции, или ее крутизну. В экспоненциальной зависимости это коэффициент B . В исследуемых массивах он в пределах погрешности одинаков: $B_\rho = 1278 \pm 46$ и $B_\sigma = 1262 \pm 56$. Если привести функциональные зависимости к одинаковому нормированному масштабу:

$$\frac{\rho(\Delta R) - C_\rho}{A_\rho} = \exp\left(-\frac{\Delta R}{B_\rho}\right);$$

$$\frac{\sigma(\Delta R) - C_\sigma}{A_\sigma} = \exp\left(-\frac{\Delta R}{B_\sigma}\right), \quad (5)$$

то кривые, являющиеся интегральными характеристиками массивов, совпадают, хотя их локальные статистические распределения неодинаковы.

На рис. 5 представлены отклонения ρ и σ от их аппроксимирующих кривых, параметры которых приведены в табл. 1 и 2 как функции расстояния между пунктами. Видно, что для ρ наибольшее расхождение между регрессионной кривой и значениями коэффициентов наблюдается на расстоянии $1000 \div 2500$ км, в то время как для рассогласования — начиная с 4000 км. Отличается и внешний вид гистограмм.

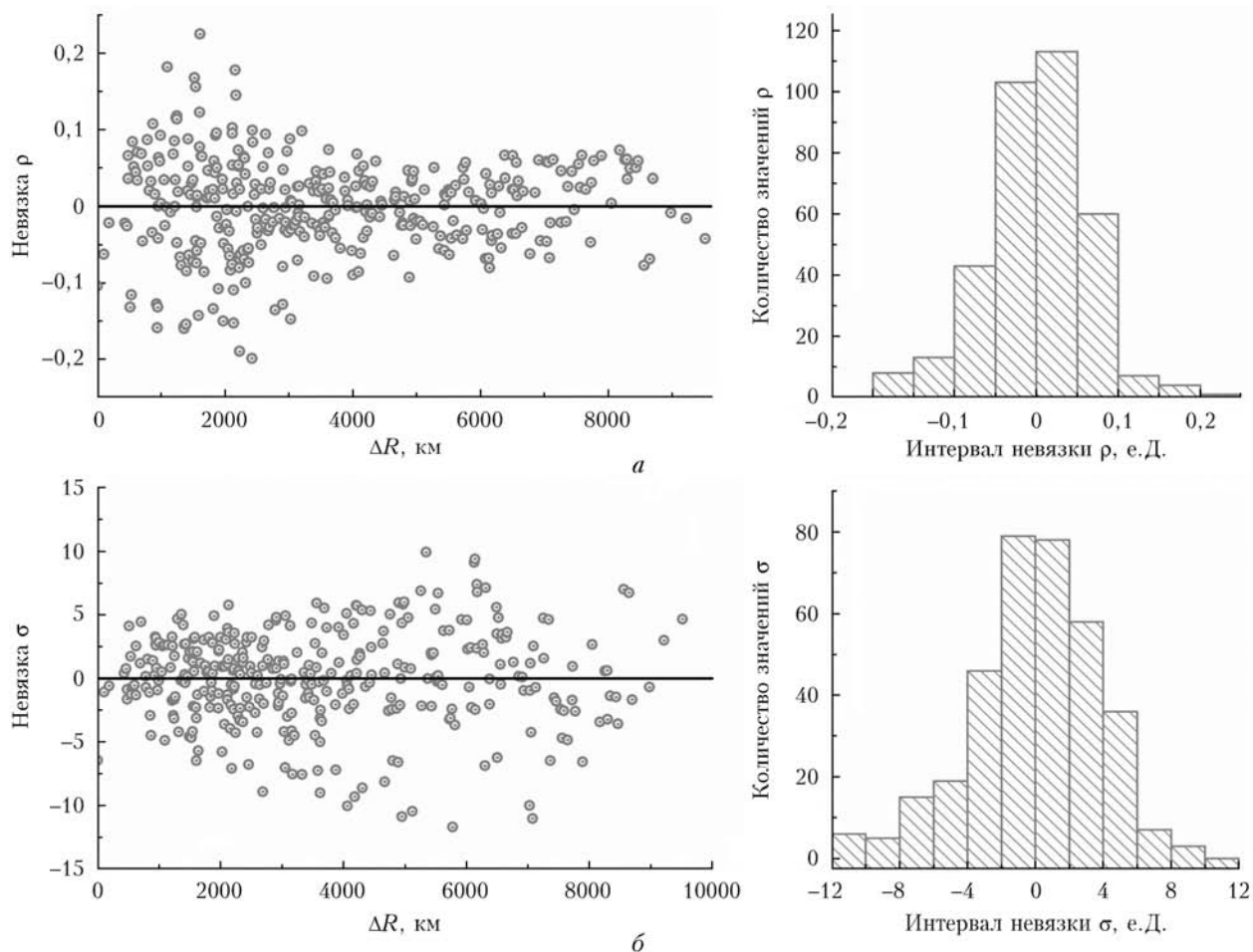


Рис. 5. Изменение отклонения с расстоянием и гистограмма коэффициентов корреляции (а) и рассогласования (б)

Совпадение результатов исследования процессов, формирующих поле ОСО, проведенное с двух разных позиций, с помощью двух разных алгоритмов (подобия и рассогласования данных) и, как следствие, с разной статистикой массивов, свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Заключение

Результаты исследования поля общего содержания озона на территории России по данным измерения прибором ОМІ в течение 2005–2022 гг. выявили устойчивую тенденцию увеличения ОСО с запада на восток, которая хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени с доминирующим влиянием линейного слагаемого.

Рассчитанные коэффициенты корреляции на основе временных рядов ОСО между разными областями (пунктами) наблюдений позволили сформировать пространственную автокорреляционную функцию поля ОСО. Ранее подобная процедура определения пространственной АКФ в литературе представлена не была. С помощью полученной АКФ была проведена оценка размеров неоднородностей поля ОСО на территории России. Выяснено, что

коэффициент корреляции уменьшается с увеличением расстояния между пунктами.

Иную зависимость от расстояния имеет параметр «рассогласование данных»: он увеличивается. Обычно он применяется для валидации данных, но в настоящей статье используется как альтернативный коэффициент корреляции для исследования поля ОСО. По его значениям также был сформирован массив рассогласования данных об ОСО и построена регрессионная кривая в виде экспоненциальной зависимости от расстояния. Коэффициенты экспоненциальных зависимостей, определяющие крутизну АКФ, и функции рассогласования данных от расстояния оказались одинаковыми в пределах погрешности. Совпадение результатов исследования процессов, формирующих поле ОСО, двумя разными методологическими подходами и алгоритмами, свидетельствует о достоверности полученных результатов и правомочности обоих подходов к проведению подобного рода исследований.

В целом результаты анализа ОСО на территории России подчеркивают особенности его распределения в пространстве и указывают направление дальнейших исследований ОСО в средних широтах не только России, но и всего Восточного полушария в целом, а также в более южных широтах и в Западном полушарии.

Список литературы

1. Ларин И.К. Химия озонового слоя и жизнь на Земле // Химия и жизнь. 2000. № 7. С. 10–15.
2. Обридо В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Храмова Е.Г., Кацова М.М., Лившиц М.А. Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований // Проблемы эволюции биосферы. Сер. Гео-биологические системы в прошлом. М.: ПИН РАН, 2013. С. 66–94.
3. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит земли и его изменения. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 287 с.
4. Александров Э.Л., Седунов Ю.С. Человек и стратосферный озон. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 104 с.
5. Angus Fergusson / B. McArthur, D. Tarasick, T. McElroy. Ozone Depletion and Climate Change: Understanding the Linkages. Meteorological Service of Canada, 2001. 28 p.
6. Staehelin J., Harris N.R.P., Appenzeller C., Eberhard J. Ozone trends: A review // Rev. Geophys. 2001. V. 39, N 2. P. 231–290. DOI: 10.1029/1999RG000059.
7. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Ельников А.В. Наблюдение прорыва стратосферных воздушных масс в верхнюю тропосферу по лидарным измерениям озона // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 593–599.
8. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Никифорова М.П. Мониторинг общего содержания озона и УФ-облученности: основные результаты // ПЭММЭ. 2017. Т. XXVIII, № 6. С. 85–97. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-6-85-98.
9. Fioletov V.E., Labow G.J., Evans R., Hare E., Köhler U., McElroy C., Miyagawa K., Redondas A., Savastiouk V., Shalamyansky A., Staehelin J., Vaniček K., Weber M. Performance of the ground based total ozone network assessed using satellite data // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. D14313. DOI: 10.1029/2008JD009809.
10. OMI Team. Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide. OMI-DUG-5.0. 2012. 62 p.
11. Veeffkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS Technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44, N 5. P. 1239–1244. DOI: 10.1109/TGRS.2006.871204.
12. Aura. Validation data center. URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMDOAO3/> (last access: 06.12.2023).
13. Dobson G.V.B. Atmospheric ozone and the movement of air in the stratosphere // Pure. Appl. Geophys. 1973. V. 106–108, N 5–7. P. 1520–1530.
14. Dütsch H.U., Zülling W., Ling Ch.Ch. Regular ozone observations at Thalwil, Switzerland, and at Boulder, Colorado. Zürich: LAPETH, 1970. 280 p.
15. Dütsch H.U., Ling Ch.Ch. Six year of regular ozone sounding over Switzerland // Pure. Appl. Geophys. 1973. V. 106–108, N 5–7. P. 1151–1167.
16. Кашкин В.Б. Стратосферный озон: вид с космической орбиты / под ред. В.Б. Кашкина, Т.В. Рублева, Р.Г. Хлебопрос. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.
17. Ананьев Л.Б., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности распределения общего содержания озона на территории России по данным ИСЗ (2005–2009 гг.) и их использование для оценки опасности ультрафиолетовой облученности // Тр. Гидрометеоцентра России. 2010. № 344. С. 186–198.
18. Катаев С.Г., Кусков А.И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств: I. Составляющие полей озона и их структура // Вестн. ТГПУ. Сер.: Естественные и точные науки. 1998. Вып. 5. С. 3–9.
19. Катаев С.Г., Кусков А.И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств. II. Классификация составляющих полей озона // Вестн. ТГПУ. Сер.: Естественные и точные науки. 1998. Вып. 5. С. 10–15.
20. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных процессов. М.: Книга, 2012. 514 с.
21. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИДАНА, 2004. 573 с.
22. Баженов О.Е., Невзоров А.В., Смирнов С.В., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение результатов наземных и спутниковых наблюдений общего содержания озона над Томском за период 2006–2020 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 2. С. 111–115. DOI: 10.15372/AOO20230205.
23. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Сравнение спутниковых и наземных измерений общего содержания озона // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 83–91.

O.E. Bazhenov, A.V. Elnikov, V.A. Loginov. Specific features of distribution of total ozone column field over the territory of Russia, its interrelations, and data mismatch.

The study of the field of total ozone column (TOC) is one of the important problems of atmospheric optics. In this paper, the spatial distribution of TOC over the Russian territory is analyzed based on Aura/OMI (Ozone Monitoring Instrument) data. The observation results for individual areas (points) are presented in the form of TOC time series, which cover the observation period from January 2005 to December 2022. Integral (excluding seasonal variations) latitude-longitude features of TOC distribution over the territory under study are revealed; correlation coefficients between the TOC series for different points are calculated; their relationship is studied depending on the distance between the points; the spatial autocorrelation function is derived and the sizes of spatial inhomogeneities of the TOC field are estimated. The spatial mismatch of the data is analyzed using a parameter which is a measure of the standard deviation from the average mismatch. The results of the work provide an idea of the scale of the spatial correlations in the TOC field and can be used for clarifying the optically active component of the atmosphere when developing weather and climate change prognostic models.